

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Studium rozložení světla mikrobežky optické bezvláknové sítě

Study of micro-cells distribution in optical wireless network

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Peter Hajduk

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Studium rozložení světla mikrobuňky optické bezvláknové sítě
Study of Micro-Cells Distribution in Optical Wireless Network

Zásady pro vypracování:

Optické bezvláknové sítě představují alternativní řešení pro optické metalické i vláknové sítě. V závislosti na konfiguraci zdrojů optického záření vznikají mikrobuňkové optické sítě. Cílem absolventské práce navrhnout vhodné rozmístění zdrojů optického záření pro ideální pokrytí prostoru. Experimentální měření bude prováděno v laboratorní podmínkách (temná místnost).

- 1) Zdroje optického záření, které se používají v osvětlování místností.
- 2) Změřte parametry zdrojů optického záření, které jsou vhodné pro optické bezvláknové sítě v rámci místnosti.
- 3) Navrhněte systém mikrobuňek pro optické bezvláknové sítě v rámci místnosti.
- 4) Změřte rozložení světla v prostoru (temná místnost).

Seznam doporučené odborné literatury:


HELD, Gilbert. *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*. Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 170 p. ISBN 978-1-4200-7662-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru, z ktorých som čerpal.

Dňa: 2.5.2013

.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Koudelkovi za užitočnú odbornú pomoc a poskytnuté rady pri spracovaní bakalárskej práce.

Abstrakt:

Bakalárska práca sa zaoberá optickými bezvláknovými dátovými sieťami využívajúcimi oblasť viditeľného optického žiarenia, s hlavným zameraním na siete pre vnútorné priestory s priamou viditeľnosťou LOS. V úvodných kapitolách práca rozoberá súčasné technológie optických bezvláknových sietí a zdrojov optického žiarenia, ktoré sú vhodné pre osvetľovanie vnútorných priestorov. Podľa výsledkov z teoretického rozboru sú v ďalšej kapitole testované jednotlivé parametre vybraných zdrojov optického žiarenia na vytvorených experimentálnych pracoviskách. V závere práce je zostrojený LED zdroj optického žiarenia, ktorý je simulovaný v programe MATLAB a LightTools na základe získaných poznatkov z praktických meraní. Výsledky z programov sú následne porovnávané s reálnymi výsledkami dosiahnutými v laboratórnych podmienkach (temná miestnosť).

Kľúčové slová:

Optická bezvláknová dátová sieť, viditeľné optické spektrum, systém mikrobuniek pre optické bezvláknové siete, svetelné zdroje súčasnosti, parametre LED, optický bezvláknový kanál.

Abstract:

Bachelor thesis is dedicated to optic wireless data networks that use visible optic radiation, with main focus on networks for line-of-sight interior (LOS). In introductory chapters of the thesis, there are analyzed contemporary wireless optic data networks technologies and sources of optic radiation that are suitable for illumination of interiors. In practical chapter, there are tested particular parameters of selected optic radiation sources in created experimental workplaces on the base of the results from theoretical analysis. In the end of the thesis, LED source of optic radiation stimulated through programmes MATLAB and LightTools was constructed with using information acquired by practical measurement. Outcomes from programmes were compared to real outcomes from laboratory conditions (a dark room).

Keywords:

Optical wireless data network, visible light optical spectrum, system of micro-cells for optical wireless network, current luminous sources, LED parameters, optical wireless channel.

Zoznam použitých symbolov a skratiek

A_{pd}	plocha oblasti príjmu fotodiódy
A_{ref}	plocha elementu odrazivosti vo vnútri miestnosti (reflektor)
c	rýchlosť svetla vo vákuu [m.s^{-1}]
e	elementárny náboj elektrónu, ktorý má hodnotu $1,602.10^{-19}\text{C}$
E	osvetlenie [lx]
ε_0	absolútna permitivita vákua [F.m^{-1}]
ε_r	relatívna permitivita prostredia
f	frekvencia [Hz]
$g(\psi)$	zisk optického koncentratora
h	Planckova konštanta, ktorá má hodnotu $h = 6,62.10^{-34}\text{J.s}$
$h(t)$	impulzná odozva systému
H_d	rovnako smerný kanálový zisk priamej trasy medzi vysielateľom a prijímačom
I	svietivosť [cd]
$I(0)$	svietivosť optického žiarenia v normále vyžarovacej plochy
$i_{ph}(t)$	okamžitý fotoprúd fotodiódy v prijímači
L	jas svetla [cd/m^2]
m	rád Lambertóvských zdrojov optického žiarenia
$n(t)$	prídavný šum v optickom komunikačnom kanály
\varnothing	uhol od normály vyžarovacej plochy (zdroja optického žiarenia)
$P_i(t)$	okamžitá hodnota výstupného optického výkonu vysielateľa
P_t	priemerný prenášaný optický výkon bezvláknovým kanálom
Q	svetelná energia [J]
r	polomer [m^2]
S	plocha, na ktorú dopadá svetelný tok [lx]
t	čas [s]
$T_s(\psi)$	zisk optického filtra
U	prahové napätie diódy [V]
v	rýchlosť svetla v danom prostredí [m.s^{-1}]
$V(\lambda)$	spektrálna distribúcia optického výkonu
λ	vlnová dĺžka svetla [nm]
μ_0	absolútna permeabilita vákua [H.m^{-1}]

μr	relatívna permeabilita prostredia
$\rho (\lambda)$	spektrálna odrazivosť materiálu
ψ	uhol medzi normálou kolmou na prijímaciu oblasť fotodiódy a dopadajúcim optickým žiarením
ψ_c	medzný uhol príjmu fotodiódy
Ω	priestorový uhol [sr]
Φ	svetelný tok [lm]
Φ_e	žiarivý tok [Wm^{-2}]
AlGaAs	aluminium gallium arsenide
AlGaInP	aluminium gallium indium phosphide
AlGaN	aluminum gallium nitride
AlGaP	aluminium gallium phosphide
AlInGaP	aluminum Indium gallium phosphide
AlN	aluminium nitride
APR	automatické zníženie výkonu vysielacza (Automatic Power Reducion)
BER	bitová chybovosť (Bit Error Rate)
CRI	index farebného podania
ELD	elektroluminiscenčná dióda
FSO	optická bezvláknová dátová sieť P2P (Free Space Optic)
GaAs	gallium arsenide
GaAsP	gallium arsenide phosphide
GaN	gallium nitride
GaP	gallium phosphide
IEEE	inštitút pre elektrotechnické a elektronické inžinierstvo (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
InGaN	indium gallium nitrid
IrDA	spoločnosť, ktorá vytvára štandard pre optickú bezvláknovú komunikáciu v blízkej infračervenej oblasti (Infrared Data Association)
IS	obrazový senzor (Image Sensor),
LED	luminiscenčná dióda
LOS	priama viditeľnosť (Line of Sight)
NLOS	nepriama viditeľnosť (Non Line of Sight)
OFDM	ortogonálny frekvenčne delený multiplex (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

OOK	modulácia, kde je amplitúda signálu kvantovaná do 2 úrovni (On-Off Keying)
P2P	komunikácia medzi dvomi koncovými zariadeniami (Point-to-Point)
PLL	slučka fázového závesu (Phase-Locked Loop)
RZ	modulačný formát s návratom k nule (Return to Zero)
SiC	silicon karbide
VLC	optický bezvláknový komunikačný systém určený pre vnútorné priestory využívajúce optické žiarenie vo viditeľnej oblasti (Visible Light Communications)
VPPM	variabilne pulzná polohová modulácia (Variable Pulse Position Modulation)
WPAN	bezdrôtová osobná sieť (Wireless Personal Area Network)
YAG	yttrito-hlinitý granát
YAG:Ce	žltý luminofor ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}_3$)

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Vlastnosti svetla	2
2.1	Teplota svetla	2
2.2	Frekvencia svetla (farba)	3
2.2.1	Odtieň farby.....	3
2.2.2	Sýtosť farby	3
2.2.3	Svetlosť farby	4
2.3	CRI – Index podania farby	4
3	Fotometrické veličiny	5
3.1	Svetelná energia	5
3.2	Svetelný tok.....	5
3.3	Svietivosť	5
3.4	Priestorový uhol	6
3.5	Osvetlenie	6
3.6	Jas	6
4	Svetelné zdroje používané v súčasnosti na osvetľovanie miestností	7
4.1	Teplotné zdroje.....	7
4.1.1	Klasická žiarovka	7
4.1.2	Halogénová žiarovka	8
4.2	Výbojové zdroje	8
4.2.1	Lineárna žiarivka	8
4.2.2	Kompaktná žiarivka.....	9
4.3	Priamo emitujúce svetelné žiarenie (LED).....	10
4.3.1	Organické LED (OLED)	11
4.3.2	Výkonové LED.....	11
4.3.3	Výkonové LED bielej farby	11
4.3.4	Výkonové RGB LED.....	13
5	Optické bezvláknové dátové siete.....	15
5.1	Bezpečnosť pri prenose dát v optických bezvláknových sieťach.....	15
5.2	Optické bezvláknové dátové siete pre vnútorné priestory	15
5.2.1	IrDA.....	17
5.2.2	Optické bezvláknové dátové siete pre vnútorné priestory vo viditeľnej oblasti...	17

5.2.3	IEEE 802.15.7	18
5.3	Optický bezvláknový kanál	19
5.3.1	Obečný model optického bezvláknového kanálu	19
5.3.2	Optický bezvláknový kanál vo viditeľnej oblasti	21
6	Experimentálne meranie parametrov LED	22
6.1	Návrh experimentálneho pracoviska	22
6.1.1	Experimentálne pracovisko pre meranie optického výkonu, napätia a spektra	22
6.1.2	Experimentálne pracovisko pre meranie vyžarovacích charakteristík	23
6.2	Namerané a dosiahnuté výsledky	24
6.2.1	Volt-Ampérová (VI) charakteristika.....	24
6.2.2	Prevodová (PI) charakteristika	25
6.2.3	Spektrálna charakteristika.....	25
6.2.4	Vyžarovacia charakteristika	27
7	Návrh systému mikrobuniek pre optickú bezvláknovú sieť v rámci miestnosti	28
7.1	Simulácia systému mikrobuniek v programe MATLAB a LightTools	28
7.1.1	Simulácia v programe MATLAB	29
7.1.2	Simulácia v programe LightTools	32
8	Rozloženie svetla v priestore.....	35
8.1	Zariadenie FESTO.....	35
8.2	Meranie rozloženia svetla v priestore s použitím zariadenia FESTO.....	37
8.3	Výsledné rozloženie svetla v priestore temnej miestnosti.....	39
9	Záver.....	41
	Zoznam použitej literatúry.....	42
	Zoznam príloh	44

1 Úvod

Témou tejto bakalárskej práce sú optické bezvláknové dátové siete využívajúce oblasť viditeľného optického žiarenia so zameraním na vnútorné priestory. Tento typ sietí predstavuje progresívne sa vyvíjajúcu oblasť informačných technológií, ktorá umožňuje ľuďom byť viac flexibilnými, pretože nemusia ostávať na pevnom mieste pri zdieľaní informácii. Optické bezvláknové dátové siete predstavujú alternatívne riešenie pre optické metalické a vláknové siete.

V mojej práci ide nielen o všeobecne poznatky ohľadom optických bezvláknových dátových sietí využívajúcich oblasť viditeľného žiarenia, ich typov a technológií, ale aj o štúdie optických zdrojov používaných v súčasnosti na osvetľovanie miestností a testovanie ich jednotlivých parametrov. V súčasnosti sú klasické svetelné zdroje nahradzované pre ich nedostačujúce vlastnosti progresívne sa rozvíjajúcou technológiou LED (Light Emitting Diode). Táto technológia zaznamenáva dynamický rast hlavne z dôvodu efektívneho výskumu v oblasti zvyšovania merného výkonu a možnosti výberu farebného odtieňa pri kvalitnom podaní farieb CRI (Color Rendering Index), čo rozširuje oblasť využitia LED. Práve vývoj technológií osvetlenia prostredníctvom bielych výkonových LED bol impulzom k myšlienke vývoja optických bezvláknových dátových sietí založených na optickom žiarení vo viditeľnej oblasti spektra VLC (Visible Light Communications). Tento typ bezvláknových sietí označujeme ako optické bezvláknové dátové siete pre vnútorné priestory využívajúce optické žiarenie v oblasti viditeľného spektra. V posledných rokoch je zaznamenávaný obrat výskumu od prenosu informácii po optickom vlákne k prenosu informácii prostredníctvom bezvláknových sietí. Zároveň sa upúšťa od myšlienky prenosu informácie prostredníctvom nepriamej viditeľnosti medzi vysielačom a prijímačom NLOS (Non Line of Sight) a smer výskumu sa sústreďuje hlavne na priamu viditeľnosť LOS (Line of Sight), čoho príčinou je práve rozvoj polovodičového osvetlenia prostredníctvom bielych výkonových LED a s tým spojená myšlienka ich využitia ako vysielača pre komunikačné účely. Môžeme teda očakávať rozvoj koncepcie využitia viditeľnej oblasti k osvetľovaniu daného priestoru a súčasne ku komunikácii. Tieto siete zároveň riešia problémy s preťažením, vzájomným rušením a rovnako aj s bezpečnostnými rizikami, ktoré vznikli následkom veľkého rozvoja bezdrôtových sietí v posledných rokoch.

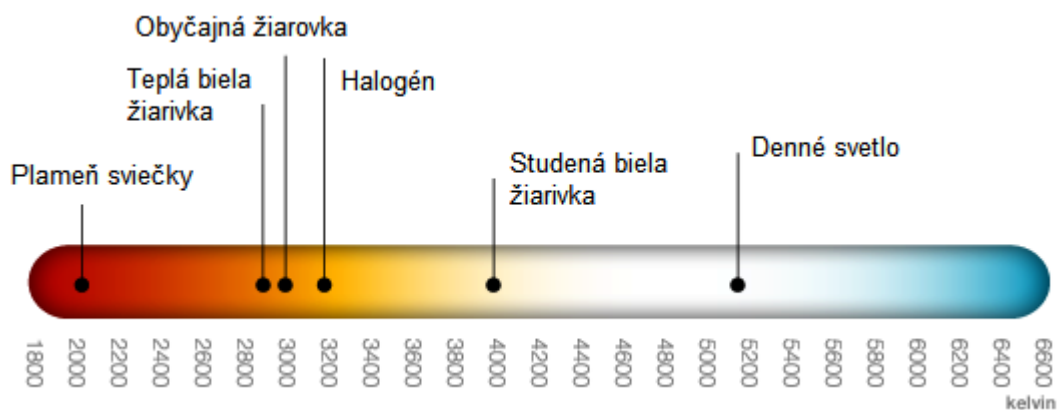
Celkový obsah bakalárskej práce môžem rozdeliť, čo sa informácii týka, na dve časti. V prvej časti ide o teoretické spracovanie informácii získaných z voľne dostupných zdrojov. Riešim tu problematiku optických bezvláknových dátových sietí pre vnútorné priestory využívajúce optické žiarenie v oblasti viditeľného spektra, ich jednotlivé technológie a trendy vývoja. Zároveň sa v tejto časti venujem porovnávaniu súčasných optických zdrojov, ktoré sa používajú na osvetľovanie miestností. V druhej časti práce ide o poznatky získané na základe praktických meraní v laboratóriách VŠB-TU Ostrava. Ide o testovanie jednotlivých parametrov výkonových a vysokosvietivých LED v závislosti na zmene teploty okolia (spektrálna, prevodová, volt-ampérová a vyžarovacia charakteristika). Na základe zistených parametrov je zostrojený zdroj optického žiarenia (LED matica 5×5), ktorý je ďalej simulovaný v programe LightTools a MATLAB. Výsledky z programov sú následne porovnávané s reálnymi výsledkami dosiahnutými pri meraní optického zdroja v laboratórnych podmienkach (temná miestnosť).

2 Vlastnosti svetla

Svetlo, ktoré vnímame okom, je z fyzikálneho hľadiska úzke pásmo v oblasti elektromagnetického spektra. Elektromagnetické vlnenie sa udáva dĺžkou periódy alebo frekvenciou. Predstavuje to frekvenciu rádovo 10^{14} Hz. Viditeľné svetlo sa nachádza v pásme od 380 nm (fialové svetlo) do 780 nm (červené svetlo). Oblasť pod 380 nm je ultrafialové žiarenie a nad 780 nm je infračervené žiarenie.

2.1 Teplota svetla

Svetelná teplota (teplota chromatičnosti) je opísaná čiarou teplotného žiariča, ktorá zodpovedá žiareniu absolútne čierneho telesa pri rôznych teplotách. Takáto teplota sa určuje iba pre spektrum bieleho svetla. Jednotkou je Kelvin alebo Mired. Teplotu chromatičnosti je možné priradiť svetlu, ktoré vyjadruje chromatičnosť umelého zdroja alebo denného svetla.



Obrázok 2.1: Farebná teplota zdrojov žiarenia.

Teplota svetla rôznych zdrojov optického žiarenia je uvedená v tabuľke 2.1.

Tabuľka 2.1: Zdroje svetla a ich teplota [1].

Zdroj svetla	Hodnota v [K]
Lineárna žiarivka ActiVivaActive	17000
Lineárna žiarivka ActiVivaNatural	13000
LED LAMBERTIAN STAR	8000
Jasná obloha	6500
LED Tube PHILIPS T8	6000
LED 5mm WHITE 20000/20°	5500
LED CREE XP-G R5	5000
Východ alebo západ slnka	3500 - 4000
Klasická žiarovka	2800
Sodíková výbojka	2200

2.2 Frekvencia svetla (farba)

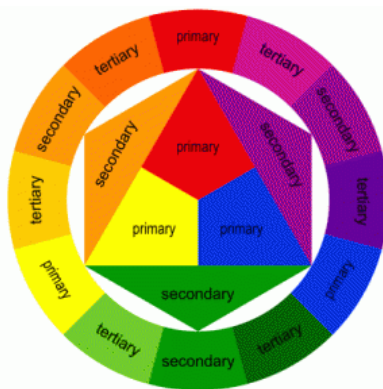
Farba je viditeľná oblasť elektromagnetického žiarenia s vlnovými dĺžkami od 380 nm do 780 nm. Zdola sa tento interval označuje ako ultrafialové svetlo a hornú hranicu tvorí zase svetlo infračervené. Farebnosť vnímame pomocou receptorov ľudského oka nazývanými čípky, ktorými vnímame tri základne farby (modrá, zelená a červená). Tieto farby sú označované ako primárne a s ich pomocou môžeme skladaním vytvoriť ostatné možné farby a odtiene. Napríklad čiernu farbu vidíme, ak nevnímame žiadnu z primárnych farieb a naopak bielu vidíme, keď vnímame súčasne všetky tri primárne farby. Tabuľka 2.2 znázorňuje rozloženie farieb pre jednotlivé frekvencie.

Tabuľka 2.2: Farby a frekvencie svetla [2].

Farba	Rozsah frekvencií [THz]	Rozsah vlnových dĺžok [nm]
červená	375 - 480	625 - 800
oranžová	480 - 510	590 - 625
žltá	510 - 530	565 - 590
zelená	530 - 580	520 - 565
tyrkysová	580 - 600	500 - 520
modrá	600 - 700	430 - 500
fialová	700 - 750	400 - 430

2.2.1 Odtieň farby

Pri vyjadrovaní odtieňov farieb môžeme efektívne využiť farebný kruh, viď obrázok 2.2.



Obrázok 2.2: Farebný kruh vyjadrovania odtieňov farieb.

Táto metóda zobrazuje farby v kruhu rozdelenom na príslušný počet častí s primárnymi farbami uprostred. Štandardný farebný kruh obsahuje 12 rozdielnych odtieňov bez vizuálnej informácie o saturácii alebo jase. Odtieň je teda pomer troch základných primárnych farieb z receptora oka.

2.2.2 Sýtosť farby

Vyjadruje intenzitu farby pomocou zloženia monochromatického a bieleho svetla. Sýtosť farby je tým väčšia, čím menší je rozsah vlnových dĺžok a menšie množstvo zložiek bieleho svetla. Udáva sa v percentách (%).

2.2.3 Svetlosť farby

Svetlosť farby závisí od relatívnej veľkosti podráždenia sietnice, a teda aj od citlivosti oka na jednotlivé farby. Ľudské oko je najcitlivejšie na strednú časť farebného spektra. Udáva sa v %, pričom 100 % sa označuje celkom biela farba a maximálny jas, ktorý je zdroj schopný vyprodukovať. 0 % označuje farbu čiernu, teda celkom tmavý bod.

2.3 CRI – Index podania farby

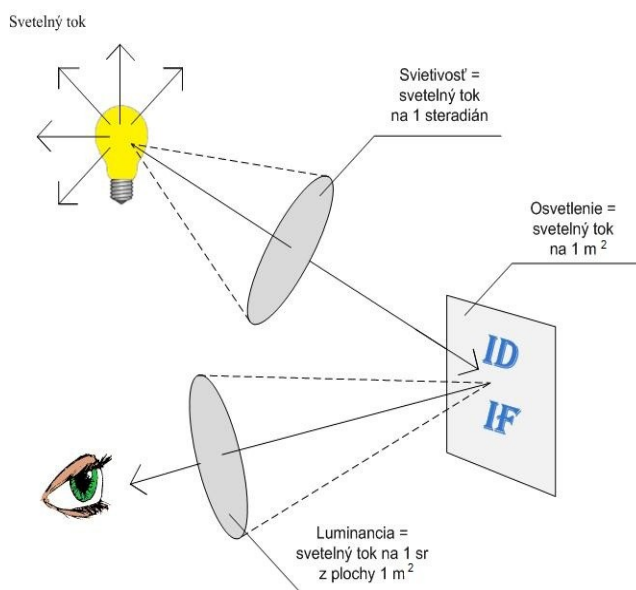
Index podania farieb Ra je hodnotenie farebného vnímania, ktorý vznikne osvetlením svetelného zdroja v porovnaní s tým, aký farebný vnem by vznikol vo svetle slnka. Hodnota Ra môže byť od 0 do 100. Je to percentuálne vyjadrenie podielu vlnových dĺžok slnečného svetla v umelom osvetlení. Hodnota Ra = 0 znamená, že pri tomto osvetlení nie je možné rozoznať farby. V takom prípade by sme videli šedo. Ale ak Ra = 100 znamená to, že je to svetelný zdroj obsahujúci všetky vlnové dĺžky, a tým umožňuje prirodzené podanie farieb.

Tabuľka 2.3: Index podania farieb Ra pre jednotlivé zdroje svetla [1].

Hodnota Ra	Zdroje svetla
Ra 100	klasická/halogénová žiarovka (3200K)
Ra 95	LED LEXTAR COB (4000K)
Ra 90	Lineárna žiarivka ActiVivaActive (17000K)
Ra 85	SMD LED ZSP NEUTRAL (4200K)
Ra 82	Lineárna žiarivka ActiVivaNatural (13000K)
Ra 64	halofosfátová žiarivka neutrálna biela (4230K)
Ra 51	halofosfátová žiarivka teplá biela (2940K)
Ra 24	vysokotlaková sodíková výbojka - MIG, SON (2100K)
Ra 5	nízkotlaková sodíková výbojka - LPS, SOX (1800K)

3 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny sú veličiny vzťahnuté k elektromagnetickému žiareniu, ktoré je viditeľné ľudským okom a kvantitatívne hodnotí toto žiarenie veľkosťou možného vizuálneho vnemu. U LED vyžarujúcej viditeľné svetlo ide o svetelný výkon. Oproti tomu u radiometrických veličín sa berie do úvahy celé spektrum vlnových dĺžok. Tu spadá aj oblasť ultrafialového a infračerveného žiarenia, ktoré je pre ľudské oko neviditeľné.



Obrázok 3.1: Schéma závislostí fotometrických veličín.

3.1 Svetelná energia

Svetelná energia je časť spektra viditeľného žiarenia, ktoré dokáže človek zachytiť zrakom. Takúto energiu do svojho okolia vyžaruje zdroj žiarenia. Jednotkou je Joule (J) alebo elektronvolt (eV). Svetelnú energiu je možné vyjadriť vzťahom (3.1) [3].

$$Q = \Phi \cdot t \quad (3.1)$$

3.2 Svetelný tok

Predstavuje svetelnú energiu vyžiarenú zdrojom za jednotku času. Jednotkou svetelného toku je lúmen (lm) a je označovaný symbolom Φ . Lumen je svetelný tok vyžarovaný do priestorového uhlu 1 steradiánu bodovým zdrojom, ktorého svietivosť je vo všetkých smeroch 1 kandela [3].

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (3.2)$$

3.3 Svietivosť

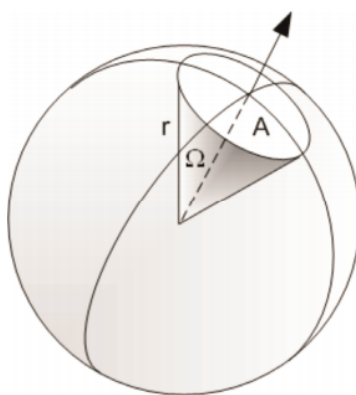
Svietivosť svetelného zdroja v danom smere je určená podielom svetelného toku vyžiareného do malého priestorového uhla a veľkosti tohto priestorového uhla (3.3). Svietivosť predstavuje intenzitu svetla, ktorú vyžaruje svetelný zdroj v danom smere [3].

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (3.3)$$

Jednotkou svietivosti je Kandela (cd). Kandela je intenzita svetla v danom smere zdroja, ktorý vyžaruje monochromatické žiarenie s frekvenciou $5,4 \times 10^{14}$ Hz a má žiarivú intenzitu v tomto smere $1/683$ W na jeden steradián. Vybraná frekvencia je z viditeľného spektra, blízka svetlu zelenej farby. Na túto frekvenciu je ľudské oko najcitlivejšie.

3.4 Priestorový uhol

Jeho veľkosť je určená veľkosťou plochy, ktorú vytne kužeľová plocha na povrchu jednotkovej gule, ktorej stred (vrchol priestorového uhlu) je totožný s vrcholom uvažovanej kužeľovej plochy. Jednotkou priestorového uhla je steradián (sr) [3].



Obrázok 3.2: Jednotka steradián [4].

Priestorový uhol Ω , pod ktorým je zo stredu gule o polomere r vidieť plochu A vyťatú na povrchu tejto gule sa určí zo vzťahu (3.4).

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (3.4)$$

3.5 Osvetlenie

Definícia osvetlenia vyplýva z podielu svetelného toku, ktorý dopadá kolmo na plochu a obsah tejto plochy (3.5). Jednotkou osvetlenia je lux (skratka lx). Jeden lux je teda jeden lúmen na meter štvorcový. Táto skratka je prevzatá z latinského slova „lux“ alebo inak povedané svetlo [3].

$$E = \frac{\Phi}{s} \quad (3.5)$$

3.6 Jas

Jas objektu je ovplyvnený svojím povrchom a intenzitou svetla, ktoré naň svieti. Čím intenzívnejšie bude svetlo, tým vyšší bude jas objektu (svetlo, ktoré jas odráža). Jas označujeme L a jeho jednotkou je kandel na m^2 (cd/m^2) [3].

4 Svetelné zdroje používané v súčasnosti na osvetľovanie miestností

V súčasnosti sa požiadavky na svetelné zdroje používané pre osvetľovanie vnútorných priestorov zmenili. Do popredia sa dostala úspora elektrickej energie, produkty neškodlivé životnému prostrediu, dlhšia životnosť a v neposlednom rade aj kvalitné podanie farieb. Klasické svetelné zdroje, medzi ktoré patria hlavne teplotné zdroje, sú úplne nahradzované pre ich malú hospodárnosť, životnosť a z dôvodu ich postupného vyradovania z výroby stanovené smernicou Európskeho parlamentu ES č.244/2000 (nariadenie stanovuje postupné vyradovanie klasických zdrojov, ktoré spadajú do energetických tried nižších ako C,D). Dôvodom legislatívy je snaha znížiť spotrebu elektrickej energie, a tým znížiť produkciu skleníkových plynov.

Výbojové zdroje svetla, ktoré sú pre svoju radu výhod (vyšší merný výkon, dlhá životnosť, vysokofrekvenčná prevádzka, dobré podanie farieb) stále často používané sú v súčasnosti taktiež nahradzované priamo emitujúcim svetelným žiarením LED (Light Emitted Diode). Táto progresívne vyvíjajúca sa technológia zaznamenáva dynamický rast hlavne z dôvodu efektívneho využívania elektrickej energie, dlhej životnosti, ekologickosti a spoľahlivosti. Zároveň vývoj merného výkonu LED a hlavne možnosti výberu odtieňu bieleho svetla rozširuje oblasť využitia LED [1].

Tabuľka 4.1: Porovnanie svetelných zdrojov používaných na osvetľovanie miestností [1].

Typ svetelného zdroja	Svetelný tok [lm]	Príkon [W]	Životnosť [h]
Žiarovka	550	50	1000
Halogénová žiarovka	1200	70	5000
T5 žiarivka	3000	54	24000
T8 žiarivka	3700	58	14000
Vysokotlaková sodíková výbojka	3300	50	24000
Nízkotlaková sodíková výbojka	7400	55	18000
Vysokotlaková ortuťová výbojka	1800	50	29000
LED trubica (360 x SMD LED)	2258	30	50000
LED žiarovka	585	7,4	50000

4.1 Teplotné zdroje

Teplotné zdroje vznikajú takzvanou inkandescenciou. Tá vzniká priechodom elektrického prúdu pevnou vodivou látkou s vysokou teplotou tavenia napríklad platina, volfrám. Pevná látka sa rozžhvie na požadovanú teplotu, pri ktorej dochádza k emisii viditeľného žiarenia. Medzi teplotné zdroje patria hlavne klasické a halogénové žiarovky.

4.1.1 Klasická žiarovka

Klasická žiarovka používa ako zdroj žiarenia vlákno z volfrámu zvinuté do jednoduchej alebo zložitej špirály. Toto vlákno je fixované do tyčinky, ktorá spolu s ďalšími sklenenými polotovarmi tvorí

takzvanú nôžku. Vláknو spolu s nôžkou je zatavené do vonkajšej banky vyrobenej z mäkkého sodno-vápenatého skla. Klasická žiarovka premení na svetlo iba 4 % spotrebovanej elektriny, pričom zvyšok elektriny odvádza do okolia vo forme tepla. Medzi ďalšie výrazné nedostatky žiaroviek patrí hlavne krátka životnosť (približne 1000 hodín svietenia) a veľký pokles svetelného výkonu v priebehu používania.

4.1.2 Halogénová žiarovka

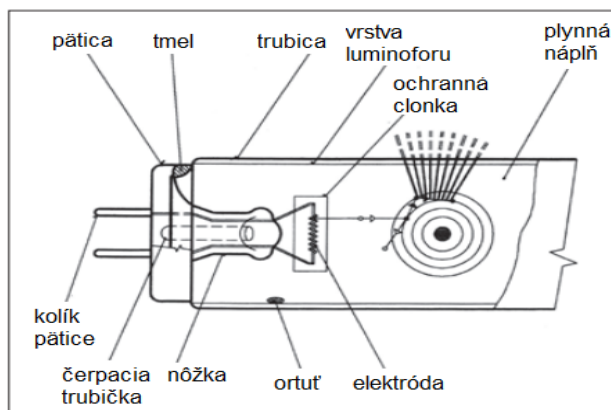
Halogénové žiarovky sú na rozdiel od klasických žiaroviek plnené prímесou halogénu alebo iných zlúčenín. Táto zmena viedla k podstatnému vylepšeniu teplotných a mechanických vlastností materiálov, ktoré boli použité pri výrobe banky (mäkká sklovina bola nahradená tvrdeným sklom) a zároveň boli odstránené všetky konštrukčné materiály, ktoré by mohli reagovať s halogénom. Halogénová žiarovka má oproti klasickej lepšiu stabilitu svetelného výkonu, vyššiu účinnosť využívania elektrickej energie a dlhšiu životnosť.

4.2 Výbojové zdroje

Výbojové zdroje svetla pracujú na princípe elektrického výboja, ktorý je schopný v určitom danom prostredí vyvolať žiarenie. Žiarenie môže byť v ultrafialovom pásme alebo priamo vo viditeľnom pásme. Keďže je ultrafialové žiarenie pre ľudský zrak neviditeľné musí sa transformovať na viditeľné žiarenie. To sa vykonáva pomocou luminoforu, látok, ktoré sú nanesené na vnútornom povrchu svetelného zdroja. Na tomto princípe pracuje v súčasnej dobe často používaný svetelný zdroj žiarivka. Žiarivky sa ďalej delia na lineárne a kompaktné, pričom oba druhy patria do kategórie nízkotlakových ortuťových výbojok.

4.2.1 Lineárna žiarivka

Trubica lineárnej žiarivky je zhotovená z mäkkého skla, pričom na jej vnútornú stenu je nanesená jedna alebo dve vrstvy luminoforu, ktoré transformujú ultrafialové žiarenie kladného ortuťového stĺpca na viditeľné žiarenie. Na oboch koncoch trubice je zatavená wolframová elektróda, na ktorej je nanesená emisná hmota na báze oxidu bárya a vápniku. Medzi hlavné výhody lineárnej žiarivky patrí vysoká účinnosť premeny elektrickej energie na svetlo, dlhá životnosť a v kombinácii s elektrickým predradníkom aj rýchly štart bez blikania.

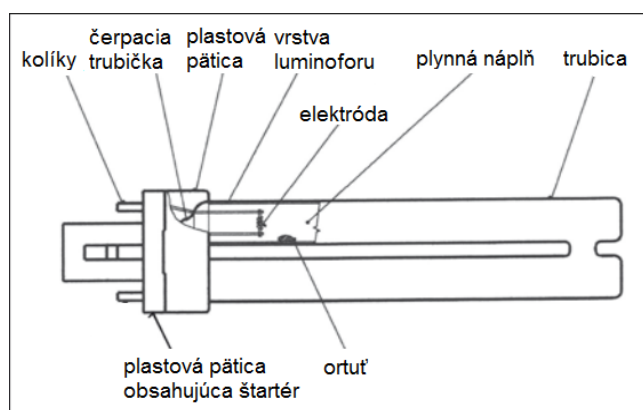


Obrázok 4.1: Konštrukcia lineárnej žiarivky [1].

Lineárne žiarivky sa vyrábajú v skupinách označovaných podľa priemeru trubice T12 (38 mm), T8 (26 mm) a T5 (16 mm). Okrem týchto typov sa vyrábajú aj kruhové žiarivky, žiarivky tvaru U alebo nízkoteplotné žiarivky so zapáľovacím pásom. V poslednej dobe sa objavujú žiarivky s vysokými hodnotami teploty chromatičnosti (8000 K, 13000 K alebo dokonca 17000 K), sú označované ako Skywhite, ActiVivaActive a ActiVivaNatural. Vyznačujú sa zvýšenou zložkou svetla v modrej oblasti spektra [1].

4.2.2 Kompaktná žiarivka

Kompaktné žiarivky pracujú na podobnom princípe ako lineárne žiarivky, kde hlavnú časť svetla vyžaruje vrstva luminoforu budená ultrafialovým žiarením. Významným konštrukčným znakom je prevedenie s jednou päticou a malé obrysové rozmery, ktoré sú dosiahnuté zložením výbojovej dráhy do niekoľkých paralelne umiestnených, ale elektricky vzájomne sériovo prepojených trubíc tak, že vytvárajú jeden spoločný výbojový priestor.



Obrázok 4.2: Konštrukcia kompaktné žiarivky [1].

Sortiment kompaktných žiariviek je vyrábaný v základných odtieňoch bielej farby a je charakterizovaný teplotou chromatičnosti 2700 – 6500 K. Hlavnou výhodou kompaktných žiariviek je vysoká účinnosť premeny elektrickej energie, dlhá životnosť a v neposlednom rade aj veľmi dobré podanie farieb ($R_a = 80 - 90$).

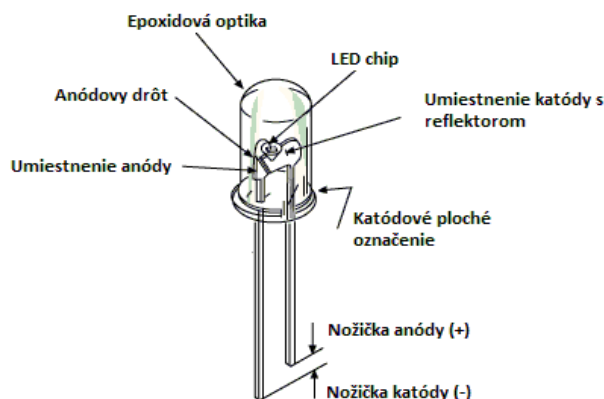
Z výbojových zdrojov svetla, ktoré priamo produkujú viditeľné žiarenie sa pre bežné osvetľovanie najčastejšie používajú halogenidové a sodíkové výbojky. U halogenidových výbojok vzniká svetlo predovšetkým žiarením párov kovov (napr. ortuť) alebo vzácnych plynov (napr. xenón). Sodíkové výbojky naopak vyžarujú svetlo pomocou sodíkových pár s tlakom v rozmedzí 0,1 – 0,5 Pa. Tabuľka 4.2 porovnáva jednotlivé výbojové zdroje svetla.

Tabuľka 4.2: Rozdelenie výbojok [1].

Druh	Príkon [W]	Merný výkon [lm/W]
Vysokotlakové ortuťové	od 50 do 1000	od 36 do 58,5
Halogenidové	od 70 do 2000	od 73 do 120
Vysokotlakové sodíkové	od 35 do 1000	od 70 do 150
Nízkotlakové sodíkové	od 17,5 do 180	od 100 do 198
Indukčné	55 a 165	od 64 do 93

4.3 Priamo emitujúce svetelné žiarenie (LED)

LED (Light Emitted Diode) je polovodičová elektronická súčiastka, ktorá vyžaruje úzko spektrálne svetlo, keď ňou prechádza elektrický prúd v priepustnom smere. V minulosti sme sa mohli stretnúť aj s označením ELD (Elektroluminiscenčná Dióda). Tieto diódy využívajú fyzikálneho javu – tzv. elektroluminescencia. Ide o vybudenie atómu pôsobením elektrického poľa a jeho následným vrátením do základného stavu. Následkom tohto javu dochádza k vyžiareniu fotónu.



Obrázok 4.3: Technológia LED (Light Emitted Diode).

Vlnová dĺžka fotónu je závislá na jeho energii, takže s rastúcou energiou bude mať fotón menšiu vlnovú dĺžku. Súčasne sa priamoúmerne mení veľkosť prahového napätia v závislosti na rastúcej šírke zakázaného pásma. Tieto závislosti sú vyjadrené vzťahom (4.1).

$$E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda} = e \cdot U \quad (4.1)$$

Vhodnou dotáciou môžeme ovplyvniť vlnovú dĺžku emitovaného svetla, ktorá je závislá na použitom polovodiči. Pri polovodičoch z kremíku Si a germánia Ge je pravdepodobnosť dosiahnutia žiarivej rekombinácie veľmi malá. Z tohto dôvodu sa používajú zlúčeniny s prvkami z tretieho a piateho stĺpca periodickej sústavy prvkov.

Tabuľka 4.3: Materiály pre výrobu LED diód [5].

Materiál	Farba svetla	Vlnová dĺžka [nm]	Napätie [V]
GaAs, AlGaAs	Infračervená	> 760	< 1,9
AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP	Červená	610 - 760	1,63 - 2,03
GaAsP, AlGaInP, GaP	Oranžová	590 - 610	2,03 - 2,10
GaAsP, AlGaInP, GaP	Žltá	570 - 590	2,10 - 2,18
InGaN/GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP	Zelená	500 - 570	1,9 - 4
ZnSe, InGaN, SiC, Si	Modrá	450 - 500	2,48 - 3,7
InGaN + luminofor	Fialová	400 - 450	2,76 - 4
AlN, AlGaIn, AlGaInN	Ultrafialová	< 400	3,1 - 4,4
SiC/GaN + luminofor	Biela	Celé spektrum	3,5

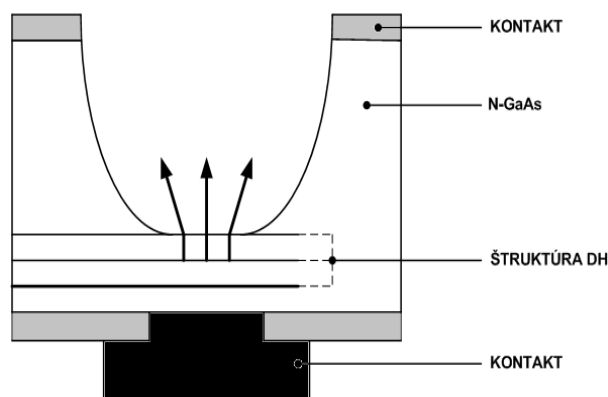
Hlavným problémom pri využívaní LED je ich malý jednotkový príkon, a teda malý svetelný tok. Aby boli schopné konkurovať ostatným svetelným zdrojom museli výrobcovia začať vyrábať zdroje zostavené z väčšieho počtu svetelných diód. Medzi takéto svetelné zdroje patrí kompaktný LED zdroj (LED light bulb), reflektorový LED zdroj (LED spot) a trubicový LED zdroj (LED tube). Kompaktný a reflektorový LED zdroj obsahujú niekoľko svetelných diód s integrovanou napájacou elektronikou umožňujúcou priamu náhradu žiarovky a reflektorovej žiarovky. Trubicový LED zdroj je skonštruovaný pre priame použitie v žiarivkových svietidlách zodpovedajúcej dĺžky [1].

4.3.1 Organické LED (OLED)

Na rozdiel od tradičných anorganických LED na báze komplexnej kryštalickej štruktúry používajú OLED ku generovaniu svetla organický materiál. Zároveň nie sú vyrábané na pevných podložkách, ale potrebné usporiadanie zaisťujú organické molekuly. Hrúbka OLED je iba niekoľko tisícín milimetra, pričom poskytujú brilantné svetlo pre extrémne ploché a extrémne jasné displeje so širokým pozorovacím uhlom. V osvetľovacej technike sa využívajú hlavne ako svetelné panely, ktoré sa používajú ako svetelné tapety.

4.3.2 Výkonové LED

Rozdiel medzi výkonovými LED a klasickými LED je v usporiadaní polovodičových vrstiev, pričom tieto vrstvy majú odlišné vlastnosti a zloženie. Použitím dvojitej heterogénnej štruktúry sa u výkonových LED dosahuje väčšia intenzita žiarenia. Táto štruktúra je tvorená z dvoch rôznych polovodičových materiálov a väčším počtom PN prechodov. K rekombinácii dier a elektrónov dochádza v tenkej oblasti, ktorú vymedzuje práve heterogénna štruktúra.



Obrázok 4.4: Štruktúra výkonovej LED.

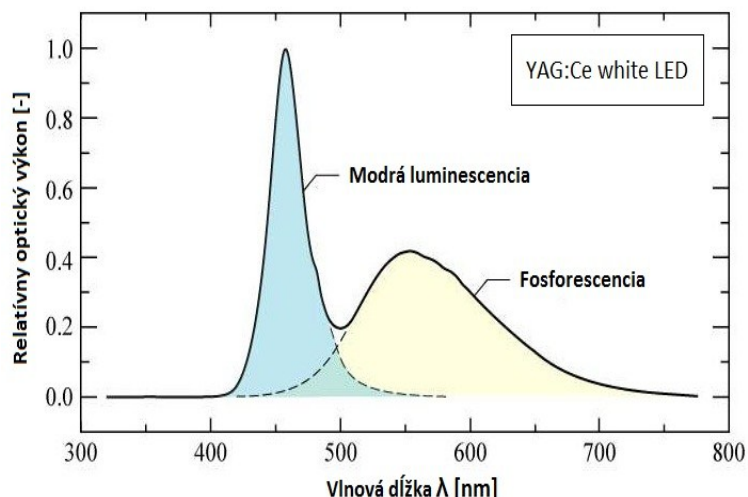
Z dôvodu optimálneho odvodu tepla je spodný kontakt LED z aktívnej oblasti. Takýmto usporiadaním sa zvyšuje stratový výkon, čím dochádza k zvýšeniu svetelného výkonu a zároveň je svetlo emitované do všetkých smerov.

4.3.3 Výkonové LED bielej farby

Výkonové LED bielej farby v skutočnosti generujú svetlo farby modrej, ale na ich povrchu je nanosená vrstva žltého luminoforu. Pretože biele svetlo zahŕňa takmer všetky vlnové dĺžky farieb, ktoré je možné vidieť ľudským okom, udáva sa jeho farebná teplota v Kelvinoch. U výkonových LED bielej farby sa používa žltý luminofor označovaný ako YAG (Yttrium, Alumínium, Garnet).

Základným kameňom tohto luminoforu je chemický prvok Yttrium. Prvok Yttrium má značku Y a je to šedý až biely pomerne vzácny kovový prvok. Tento prvok objavil v roku 1974 švédsky chemik Johan Gadolin a ako prvý ho v čistej forme izoloval Friedrich Wohler v roku 1828.

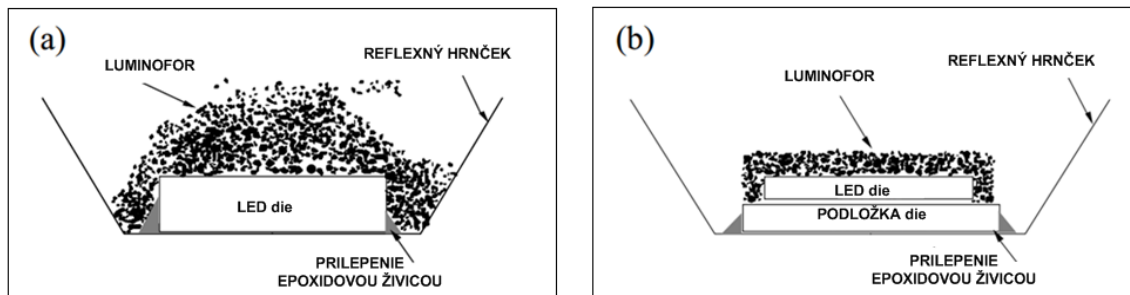
Luminofor do značnej miery absorbuje fotóny modrého svetla a následne emituje svetlo s nižšou energetickou úrovňou (dlhšou vlnovou dĺžkou). Výsledné spektrum bieleho svetla je potom tvorené luminiscenciou, ktorú vyžaruje čip a fosforescenciou, ktorú vyžaruje žltý luminofor. Takéto výsledné svetlo dvoch vlnových dĺžok vnímame ako biele svetlo.



Obrázok 4.5: Vyžarované spektrum bielej LED [6].

Vlastný čip diódy vyžaruje maximálne na vlnovej dĺžke okolo 450 nm a maximum fosforescencie na 550 nm. Takéto biele svetlo dáva neúplnú farebnú vernosť zelených a červených farieb, ktoré spôsobujú farebnú deformáciu. Zároveň je výstupná farba závislá na prúde a teplote v priepustnom smere.

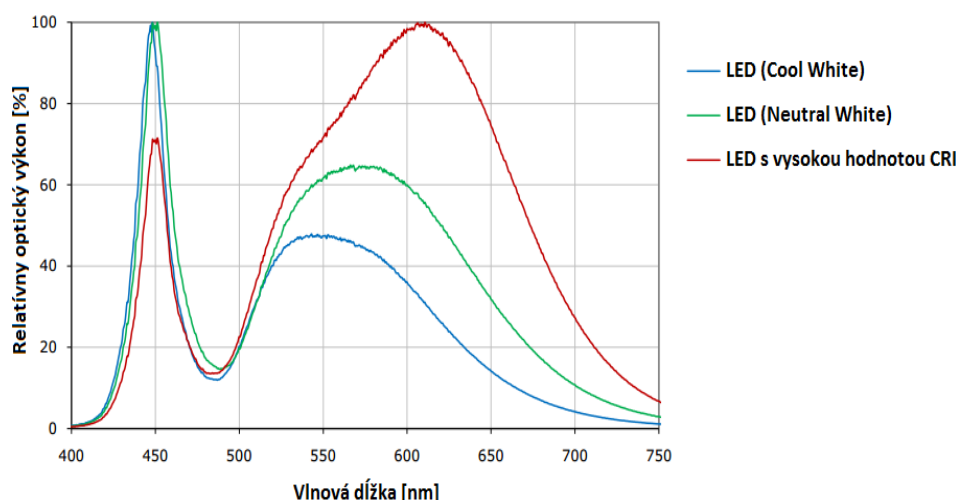
Firma Philips Lumileds uskutočnila zmeny chemického zloženia luminoforu, ktorý bol obohatený o cérium (výsledný žltý luminofor sa zapisuje v tvare $(Y_3Al_5O_{12}:Ce_3)$ (YAG:Ce)). Zmenilo sa taktiež nanášanie luminoforu na metódu Lumiramic, ktorá dramaticky zvyšuje kvalitu bieleho svetla. Metóda Lumiramic zabezpečuje rovnomerné naniesenie vrstvy luminoforu po celej ploche výkonovej LED. Súčasťou tejto technológie je aj zmena kremíkovej podložky na keramickú, ktorá má lepšie teplotné a mechanické vlastnosti.



Obrázok 4.6: Tradičná metóda nanášania luminoforu (a) a metóda Lumiramic (b) [7].

Na obrázku 4.6 je zobrazená tradičná metóda nanášania žltého luminoforu na modrý čip a vylepšená metóda nanášania Lumiramic. Pôvodná metóda spôsobuje nestálosť spektra žltých a modrých odtieňov bieleho svetla. Technológia Lumiramic túto nestálosť eliminuje a dosahuje oproti klasickej metóde až deväťnásobného zlepšenia.

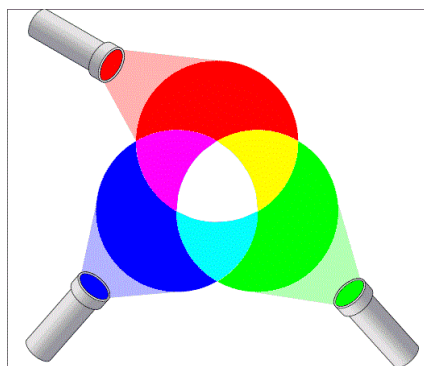
Použitím chemickej zlúčeniny CaS:Eu sa vylepšilo pohlcovanie modrého svetla, ktoré vyžaruje čip výkonovej LED. Zároveň sa zvýšila úroveň luminiscencie žltého svetla, čo má za následok vernejšiu bielu farbu a zlepšuje hodnotu CRI indexu. Využitím tejto zlúčeniny sa posunula oblasť fosforescencie do oblasti kratšej vlnovej dĺžky, čím sa výsledne svetlo posúva do oblasti s nižšou svetelnou teplotou.



Obrázok 4.7: Porovnanie klasickej LED s LED s vysokou hodnotou CRI [8].

4.3.4 Výkonové RGB LED

Skratka RGB znamená spojenie troch základných farieb a to Red (červená), Green (zelená) a Blue (modrá). RGB diódy majú spoločnú anódu alebo katódu a sú obstarané štyrmi vývodmi. Obsahujú tri nezávislé čipy (modrý, červený a zelený), ktoré sa využívajú k osvetleniu akejkoľvek inej farby pomocou spôsobu adaptívneho miešania farieb, ktorý je zobrazený na obrázku 4.8.

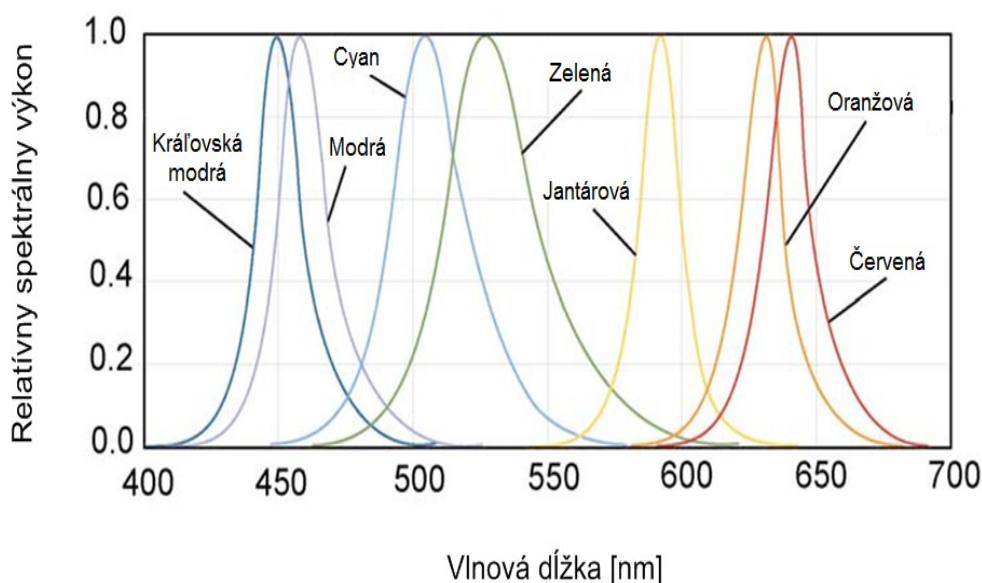


Obrázok 4.8: Adaptívny spôsob miešania farieb [9].

Adaptívne miešanie je spôsob miešania, pri ktorom sa jednotlivé zložky sčítajú a vytvárajú svetlo väčšej intenzity. Intenzita vzniknutá týmto spôsobom sa rovná súčtu intenzít jednotlivých

zložiek. Biele svetlo môžeme teda dosiahnuť generovaním intenzít troch primárnych farieb svetla. Rovnako môže biele svetlo vzniknúť aj použitím troch výkonových LED s primárnymi farbami (modrá, červená a zelená). Biele svetlo, ktoré vznikne z červenej, modrej a zelenej výkonovej LED diódy, sa nazýva Tri-chromatické biele svetlo. Svetlo bielej farby, ktoré vzniklo spojením žltej a modrej výkonovej LED diódy sa nazýva Di-chromatické biele svetlo. Nakoniec použitím červenej, zelenej, modrej a tyrkysovej vznikne svetlo Tetra-chromatické. Oproti bielym výkonovým diódam nemajú takéto diódy nanosené na povrchu luminofor a majú veľkú škálu farebných odtieňov.

Pre RGB LED sa používajú dva základne materiály pre výrobu P-N prechodov. Prvý je AlInGaP určený pre LED, ktorých vyžarovaná vlnová dĺžka zodpovedá rozsahu od 590 – 640 nm, čo je jantárová až oranžová farba. Druhým materiálom je InGaN a používa sa pre LED od vlnovej dĺžky 450 – 530 nm čo je modrá až zelená farba.



Obrázok 4.9: Dostupné farby výkonových LED diód [10].

Čipy, na ktorých konštrukciu bol použitý AlInGaP majú oproti čipom s konštrukciou z materiálu InGaN výhodu v tom, že môžu byť vystavované oveľa vyšším prúdovým hustotám typicky 140 A/cm². Čipy vyrobené z InGaN môžu byť vystavené len prúdovým hustotám do 50 A/cm².

5 Optické bezvláknové dátové siete

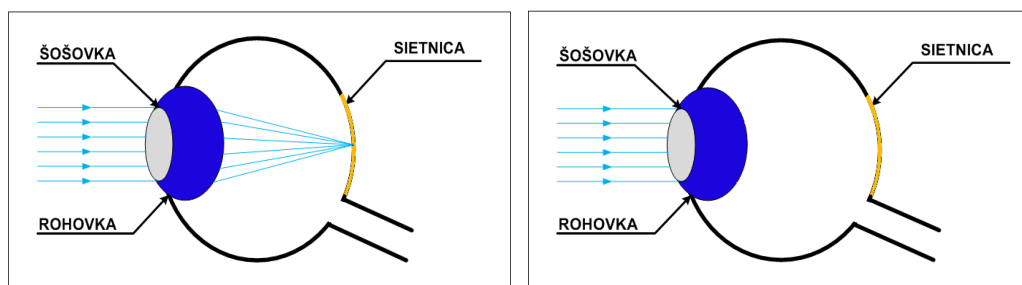
V roku 1979 bol prvýkrát predstavený koncept optickej bezvláknovej siete, a to F.R. Gfellerem a U. Bapstem [11]. Koncept, ktorý predstavili dosahoval prenosovú rýchlosť 1 Mbps a využíval difúzne optické žiarenie. V ďalších rokoch ale Charles K. Kao dokázal znížiť straty na optickom vlákne, a tým sa pozornosť výskumu presunula k prenosu informácií prostredníctvom optických vlákien. V súčasnej dobe je možné sledovať návrat k myšlienke prenosu informácií prostredníctvom bezvláknového prenosu.

Optické siete môžu dosahovať veľmi vysokých prenosových rýchlostí. Zároveň ponúkajú bezpečný a širokopásmový symetrický prenos. V porovnaní s inými sieťami nie je optická sieť závislá na obmedzenom a regulovanom spektre a kmitočtovej licenci ako sú rádiové siete. Podmienkou pre prenos je priama viditeľnosť medzi vysielačom a prijímačom. Ako vysielač sa používa laser alebo LED a ako prijímač optický detektor. Preto optické jednotky pracujú v plnom duplexnom režime. Nevýhodnou prenosu optickej bezvláknovej dátovej siete je závislosť na vplyvoch atmosférického prenosového prostredia (smog, hmla, sneh atď.) [12].

5.1 Bezpečnosť pri prenose dát v optických bezvláknových sieťach

Pretože sa pri prenose dát v optických bezvláknových sieťach používajú zdroje, ktoré sú pre človeka nebezpečné, je nutné dodržiavať isté bezpečnostné štandardy. Bezpečnosť pri prenose za pomoci lasera garantuje certifikát na konformitu s normou IEC 60825-1 [13]. Počas prenosu dát dokážu niektoré výrobky znížiť výkon lasera automaticky, ak sa niekto nachádza v dráhe paprsku APR (Automatic Power Reducion). Lasery pre $\lambda = 1550$ nm umožňujú používať väčší výkon pri stálej bezpečnej prevádzke pre ľudské oko, preto dosahujú väčšiu vzdialenosť. Pri laseroch pre vlnovú dĺžku $\lambda = 850$ nm boli z dôvodu bezpečnosti oka znížované výkonové podmienky [13].

Na obrázku 5.1 je vidieť, ako na rôzne vlnové dĺžky reaguje ľudské oko. Paprsky s vlnovou dĺžkou $\lambda = 850$ nm sú síce pre ľudské oko neviditeľné, ale preniknú až na sietnicu. Paprsky $\lambda = 1550$ nm sú absorbované šošovkou.



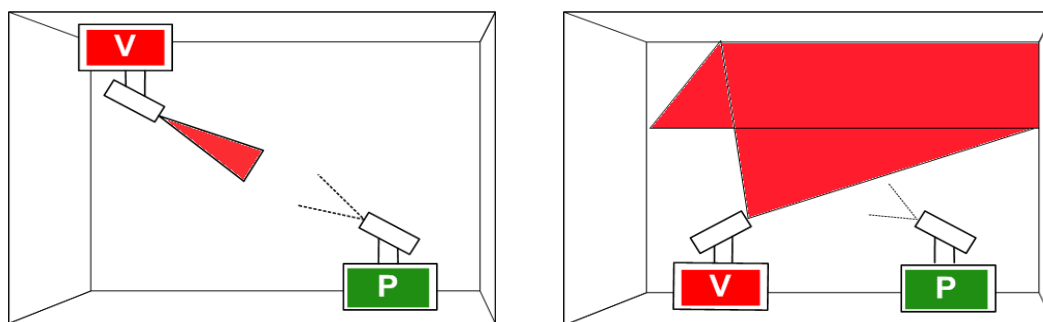
Obrázok 5.1: Reakcia ľudského oka na vlnovú dĺžku $\lambda < 1400$ nm a $\lambda > 1400$ nm.

5.2 Optické bezvláknové dátové siete pre vnútorné priestory

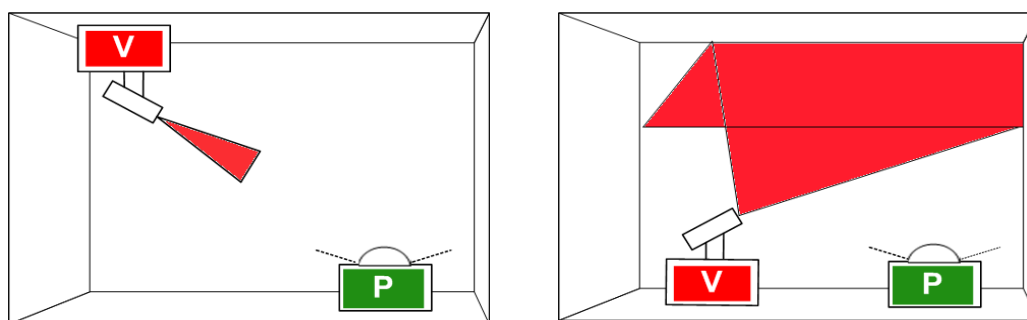
Optické bezvláknové siete pre vnútorné priestory sa, podľa kritérií pre dátový prenos informácie, rozdeľujú na niekoľko variant. Prvou sú optické bezvláknové systémy s priamou viditeľnosťou, ktoré sú označované ako LOS (Line of Sight) a druhou variantov sú systémy bez priamej viditeľnosti,

takzvané NLOS (Non Line of Sight). Systém LOS prenáša signál v rámci priamej a voľnej trasy od vysielateľa k prijímaču. Podmienkou prenosu je, aby zóna medzi vysielateľom a prijímačom bola bez akýchkoľvek prekážok, pretože ak táto podmienka nie je splnená nastáva zníženie signálu. Veľkosť zóny, ktorá musí byť bez prekážok, závisí od pracovnej frekvencie a vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom. Systém NLOS na rozdiel od systému LOS neprenáša signál v rámci priamej trasy, ale využíva odrazy od elementov v danom priestore, preto je tiež tento systém označovaný ako difúzny. Difúzne systémy fungujú bez ohľadu na prekážky či osoby v danom priestore. Nevýhodou je ich znížená prenosová kapacita, ktorá je spôsobená komplikovanou cestou signálu [14].

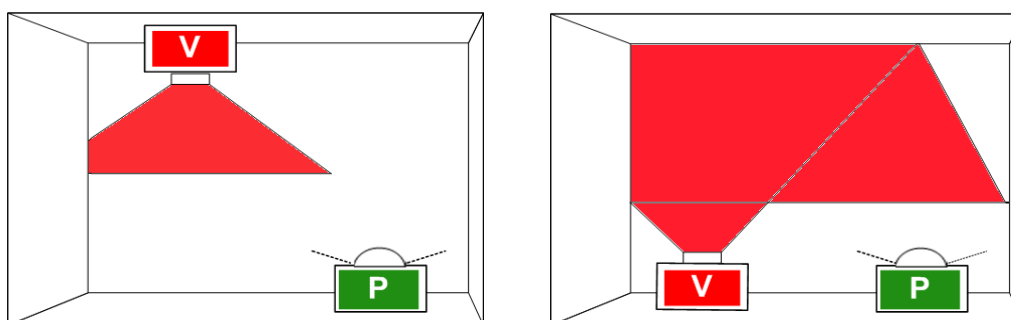
Ďalším kritériom je smerovosť medzi vysielateľom a prijímačom. Pre vytvorenie spojenia u priameho systému je potrebná smerovosť medzi vysielateľom a prijímačom. Na rozdiel od neho využíva nepriame spojenie širokouhlé vysielateľ a prijímače, čo čiastočne rieši problematiku ich polohovania. Pre zaistenie mobility koncových účastníkov je vhodné využiť práve nepriame spojenie. Náhradným riešením je hybridné spojenie, ktoré kombinuje vysielateľ a prijímače s odlišným stupňom smerovosti. Na obrázku 5.2 – 5.4 je možné vidieť klasifikáciu variant optickej bezvláknovej siete pre vnútorné priestory medzi vysielateľom a prijímačom.



Obrázok 5.2: Priama viditeľnosť LOS a nepriama viditeľnosť NLOS v priamom spojení (Directed).



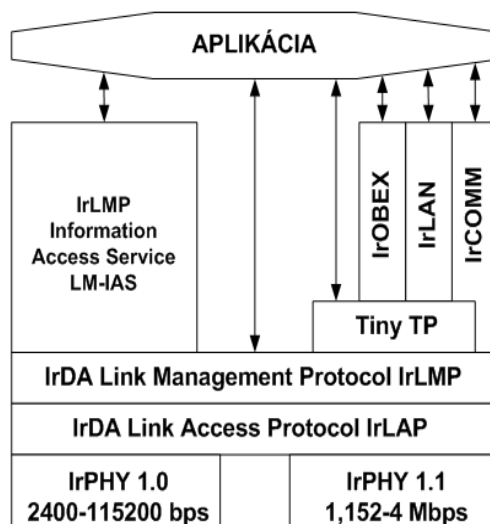
Obrázok 5.3: Priama viditeľnosť LOS a nepriama viditeľnosť NLOS v hybridnom spojení (Hybrid).



Obrázok 5.4: Priama viditeľnosť LOS a nepriama viditeľnosť NLOS v nepriamom spojení.

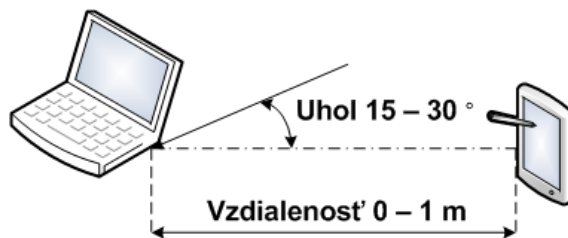
5.2.1 IrDA

IrDA je štandard vytvorený v roku 1993 organizáciou Infrared Data Association. Celá technológia je založená na komunikácii prostredníctvom svetelného lúča infračerveného svetla, ktoré sa nachádza mimo spektra viditeľnosti pre ľudské oko. Zariadenia IrDA komunikujú pomocou infračervených LED s vlnovými dĺžkami vyžarovacieho svetla 875 nm, pričom ako prijímač sú použité PIN fotodiódy. Hlavným využitím IrDA protokolu je prepojenie notebooku, telefónu, tlačiarne, atď. Na obrázku 5.5 sú zobrazené jednotlivé vrstvy IrDA protokolu.



Obrázok 5.5: Vrstvy IrDA protokolu pre komunikáciu v infračervenej oblasti [16].

Podľa normy IrDA zariadenia pracujú do vzdialenosti 1 m pri bitovej chybe BER (bit error ratio) 10^{-9} a maximálnej úrovni okolitého osvetlenia 10 klux, čo zodpovedá dennému svitu slnka. Tieto hodnoty sú definované pre nesúmernosť prijímača a vysielачa 15° , pre jednotlivé optické prvky sa meria výkon do 30° . Verzia 1.0 definuje rýchlosť od 2400 kbps do 115200 kbps pri využití modulačného formátu RZ 3/16 doby trvania bitu. Verzia IrDA 1.1 taktiež využíva modulačného formátu RZ, ale pri prenosovej rýchlosti 4 Mbps komunikačný systém vyžaduje modulačný formát 4-PPM (4-Pulse Position Modulation) a fázový záves PLL (Phase-Locked Loop). Verzia infračerveného rozhrania označovaná ako verzia 1.4 alebo FSO dosahuje prenosovú rýchlosť 16 Mbps v poloduplexnej P2P komunikácii [15].



Obrázok 5.6: Optická geometria IrDA komunikácie.

5.2.2 Optické bezvláknové dátové siete pre vnútorné priestory vo viditeľnej oblasti

V posledných rokoch sa do popredia dostávajú optické bezvláknové dátové siete pre vnútorné priestory, ktoré využívajú optické žiarenie vo viditeľnej oblasti VLC. Ako zdroj optického žiarenia sa využíva biela výkonová LED (Light Emitting Diode). Výhodou použitia LED je fakt, že signál

nepreniká stenami miestností, a tým sa zvyšuje bezpečnosť dátovej siete a zároveň nehrozí zdravotné riziko pri vystavení svetlu LED. Biele výkonové LED sa delia do dvoch kategórií podľa princípu vyžarovania svetla. Prvou kategóriou sú takzvané biele výkonové LED, ktoré v skutočnosti generujú svetlo modré za pomoci modrého čipu (450 nm). Na tomto čipe je nanosená tenká vrstva žltého luminoforu označovaného ako YAG (Yttrium, Alumínium, Garnet). Druhou kategóriou sú RGB LED, ktoré využívajú trojicu čipov (červený, modrý, zelený) a za pomoci adaptívneho miešania farieb generujú svetlo bielej farby [18].

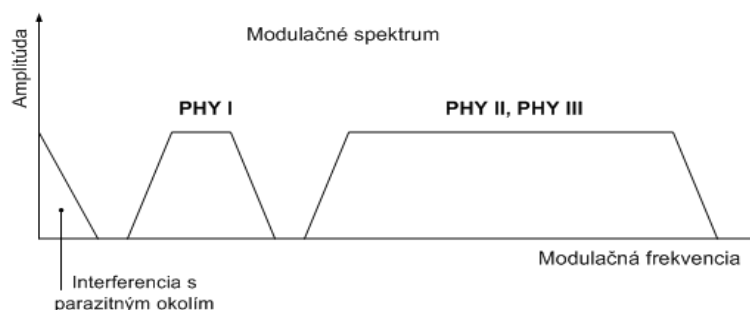
V roku 2003 Y. Tanaka prezentoval svoju prácu, v ktorej využil bielu výkonovú LED zloženú z trojice čipov RGB a pri experimentálnom meraní dosiahol prenosovú rýchlosť o veľkosti 400 Mbps. V roku 2010 sa modifikáciou modrého čipu a modulácie OFDM dosiahlo prenosovej rýchlosti 513 Mbps. V súčasnosti odborníci predpovedajú v nasledujúcich rokoch zvýšenie prenosovej rýchlosti nad 1 Gbps [17].

5.2.3 IEEE 802.15.7

Koncom roku 2011 bol zverejnený štandard pre VLC (Visible Light Communication) IEEE 802.15.7. Štandard definuje fyzickú (PHY) a MAC (Medium Access Control) vrstvu založenú na takzvanom „clean slate“ prístupe (obnova konfigurácie). Optická bezvláknová dátová sieť založená na štandarde IEEE 802.15.7 je často označovaná ako VPAN (Visible Light Communication Personal Area Network). Norma je navrhnutá pre rôzne VLC aplikácie týkajúce sa osobnej bezdrôtovej siete WPAN (Wireless Personal Area Networks). Fyzická vrstva je rozdelená do troch typov, a to PHYI, PHYII, PHYIII a tie využívajú kombináciu rôznych modulačných schém [19].

Architektúra IEEE 802.15.7 definuje tri fyzické vrstvy:

- PHYI: Tento typ je určený pre vonkajšie priestory s nízkou prenosovou rýchlosťou dát. Poskytuje prenosové rýchlosti v rozmedzí 12 až 267 kbit/s. Využíva modulácie OOK alebo VPPM.
- PHYII: Tento typ je určený pre použitie v interiéri s definovanou prenosovou rýchlosťou v rozmedzí 1,25 až 96 Mbit/s. Využíva modulácie OOK alebo VPPM.
- PHYIII: Tento typ je určený pre použitie v interiéri, kde sú k dispozícii RGB zdroje a detektory. Poskytuje prenosovú rýchlosť 12 až 96 Mbit/s.



Obrázok 5.7: Modulačné spektrum definované štandardom IEEE802.15.7.

Štandard IEEE 802.15.7 rieši taktiež problém optických bezvláknových sietí pre vnútorné priestory, a to kolísanie optického signálu pri absencii prenášaných dát. Riešenie je vo vložení

veľkosti variabilnej pokojnej časti do prenosového rámca (Idle Pattern), aby nedochádzalo k výraznej zmene optického výkonu. Pokojná časť môže byť riešená dvoma spôsobmi, a to spôsobom In-Band alebo Out-Band. In-Band nevyžaduje zmenu taktovacej frekvencie a je možné ho kontrolovať na prijímacej časti. Out-Band má podobu omnoho menších taktovacích frekvencií a variability výkonu zdroja optického žiarenia. Na použitej modulácii je taktiež závislé kolísanie optického výkonu:

- VPPM (Variable pulse position modulation): Modulačný formát je adaptovaný proti zmene optického výkonu, pretože amplitúda pulzu je vždy konštantná a prípadná korekcia sa robí pomocou zmeny šírky pulzu.
- OOK (On-off keying): Riešenie je v podobe vloženia dátového rámca za účelom nastavenia priemerného optického výkonu. Tento proces rozdelí dátový rámec na podrámce, ktoré predchádza resynchronizačné pole. Rozdelenie je realizované až keď je vypočítané FCS (Frame Check Sequence) a použité FEC (Forward Error Correction).

5.3 Optický bezvláknový kanál

Pri riešení koncepcie optického žiarenia vo vnútri miestnosti sa predpokladá, že elementy odrazu (napríklad steny, predmety) a zdroje optického žiarenia (LED) majú Lambertovský charakter. Termín Lambertovský zdroj optického žiarenia znamená, že svietivosť optického žiarenia má kosínusovú závislosť na uhlu ϕ od normály vyžarovacej plochy a môžeme ho vyjadriť vzťahom (5.1). Zdroje žiarenia, ktoré vyžarujú podľa Lambertovho zákona sa nazývajú kosínusové.

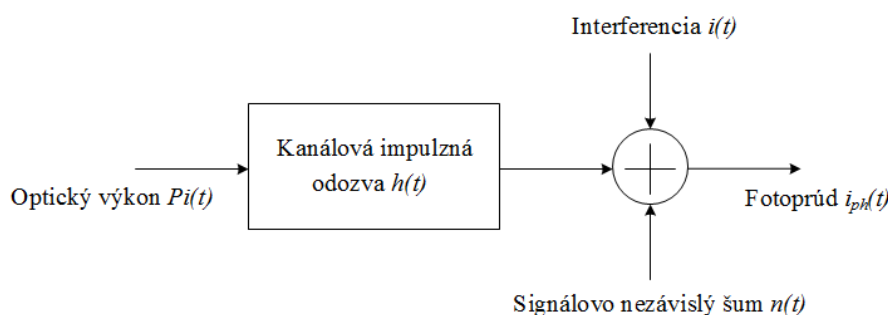
$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \quad (5.1)$$

Vo vzťahu $I(0)$ predstavuje svietivosť zdroja optického žiarenia v normále vyžarovacej plochy, ϕ je uhol od normály vyžarovacej plochy a m je rád Lambertovských zdrojov optického žiarenia. Rád Lambertovských zdrojov optického žiarenia pre polovicu vyžarovacej charakteristiky vysielača môžeme vyjadriť vzťahom (5.2) [20].

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (5.2)$$

5.3.1 Obecný model optického bezvláknového kanálu

Obecný model optického bezvláknového kanálu s priamou detekciou IM/DD (Intensity Modulation/DirectDetection) a intenzitnou moduláciou je zobrazený na obrázku 5.8.



Obrázok 5.8: Model optického bezvláknového kanála [20].

Priebeh prenášaného signálu je vo forme okamžitého výkonu $P_i(t)$ zdroja optického žiarenia vo vysielajúci (LED). Naopak výsledný prijatý signál $iph(t)$ zodpovedá okamžitému fotoprúdu fotodiódy v prijímači. Optický bezvláknový kanál je možné modelovať ako lineárny, pásmový a časovo nemenný systém s okamžitou hodnotou vstupného optického výkonu $P_i(t)$, výstupným fotoprúdom $iph(t)$ a impulznou odozvou systému $h(t)$.

Optické bezvláknové siete sú v reálnych situáciách prevádzkované v prítomnosti okolitého parazitného optického žiarenia v infračervenej alebo viditeľnej oblasti spektra. Toto parazitné žiarenie je možné minimalizovať použitím optického filtra, no napriek tomu sa pridáva výstrelkový šum, ktorý je zvyčajne dominantným zdrojom šumu v prijímači. Na obecnom modeli optického bezvláknového kanálu je tento šum označený ako $n(t)$ [17].

V prípade, že optický komunikačný kanál vo vnútri miestností tvorí iba optické žiarenie šíriace sa priamou cestou od vysieláča k prijímaču (LOS), môžeme priemerný prijatý optický výkon fotodiódy vyjadriť vzťahom (5.3).

$$P_d = \sum^{LED} P_t \cdot H_d(0) \quad (5.3)$$

kde H_d je rovnomerný zisk priamej optickej trasy v podobe:

$$H_d(0) = \left\{ \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi) \right\} \quad (5.4)$$

Vo vzťahu Ψ predstavuje uhol medzi normálou kolmou na prijímaciu oblasť fotodiódy a dopadajúcim optickým žiarením, Ψ_c je medzný uhol príjmu fotodiódy, A_{pd} je oblasť príjmu fotodiódy, $T_s(\Psi)$ je zisk optického filtra a $g(\Psi)$ je zisk optického koncentrátoru.

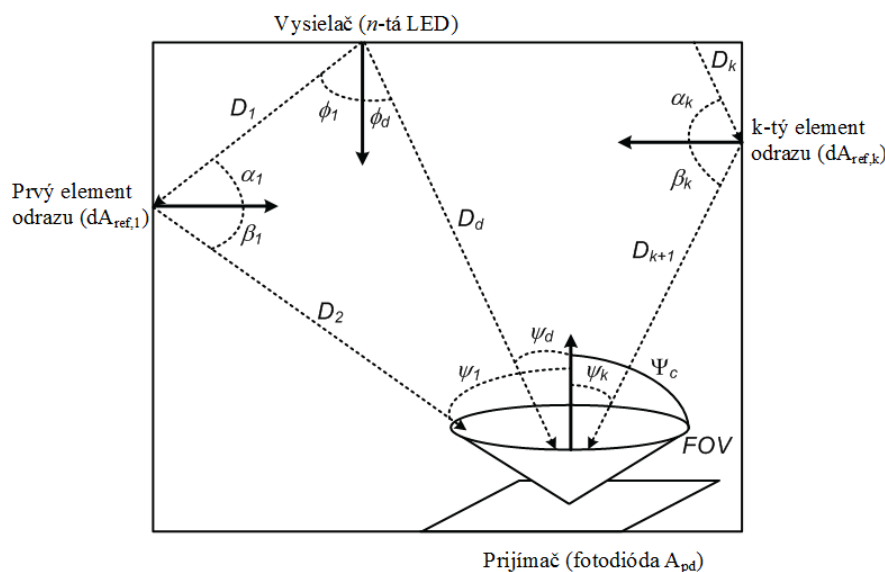
Ak uvažujeme o optickom komunikačnom kanály vo vnútri miestnosti aj s účasťou optického žiarenia, ktoré sa šíri prostredníctvom odrazov od prekážok (steny, predmety v miestnosti), zmení sa predošlý vzorec na vzťah (5.5).

$$P_r = \sum^{LED} \left\{ P_t \cdot H_d(0) + \sum^{ref} P_t dH_{ref}(0) \right\} \quad (5.5)$$

kde dH_{ref} je zisk optickej trasy prostredníctvom odrazov od prekážok v podobe:

$$dH_{ref}(0) = \left\{ \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi D_1^2 D_2^2} p dA_{ref} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi) \right\} \quad (5.6)$$

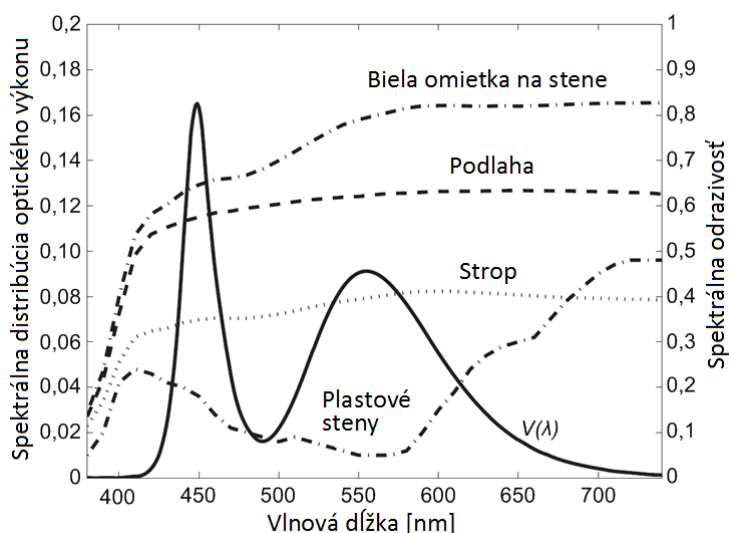
Vo vzťahu D_1 predstavuje vzdialenosť medzi vysielateľom a prijímačom, D_2 je vzdialenosť medzi prekážkou a prijímačom, p je faktor odrazu, α je uhol medzi normálou kolmou na element odrazu a dopadajúcim optickým žiarením, β je uhol medzi normálou kolmou na element odrazu a odrazeným optickým žiarením, dA_{ref} je plocha elementu odrazu, vid' obrázok 5.9.



Obrázok 5.9: Konfigurácia optického bezvláknového kanála tvoreného vysielateľom (LED), prijímačom (fotodióda) a elementmi odrazu [17]

5.3.2 Optický bezvláknový kanál vo viditeľnej oblasti

Pri optických bezvláknových dátových sieťach pre vnútorné priestory pracujúcich v oblasti viditeľného optického žiarenia sa uvažuje o použití bielych výkonových LED. Biele výkonové LED vyžarujú optické žiarenie v oblasti dvoch vlnových dĺžok. Vlastný čip diódy vyžaruje pri vlnovej dĺžke 450 nm (oblasť luminiscencie) a nanosený žltý luminofor YAG vyžaruje optické žiarenie v celom viditeľnom spektre 380 – 780 nm (oblasť fosforescencie). Spektrálna distribúcia optického výkonu, ktorá sa označuje $V(\lambda)$, popisuje vyžiarený výkon za jednotku vlnovej dĺžky.



Obrázok 5.10: Spektrálna distribúcia optického výkonu bielej výkonovej LED a spektrálna odrazivosť materiálov v miestnosti [20].

Spektrálna odrazivosť, označovaná ako $\rho(\lambda)$, predstavuje vplyv odrazivosti materiálu v závislosti na vlnovej dĺžke. Vzďialenosť medzi vysielateľom a prijímačom ovplyvňuje straty prenosovej cesty a časové oneskorenie.

6 Experimentálne meranie parametrov LED

Cieľom experimentálneho merania bolo zistenie parametrov zdrojov optického žiarenia v bezvláknových sieťach pre vnútorné priestory, ktoré využívajú viditeľné spektrum. Ako zdroje optického žiarenia boli využité výkonové a supersvietivé LED. Pre vzájomné porovnanie parametrov v rámci experimentálneho merania bolo vybraných 9 zdrojov optického žiarenia, ktoré sú uvedené v tabuľke 6.1.

Pri experimentálnom meraní boli využité mnou navrhnuté experimentálne pracoviská, ktoré boli navrhnuté tak, aby sa vďaka nim dali zaznamenávať jednotlivé parametre LED. Celé experimentálne meranie prebiehalo v tmavej miestnosti.

Tabuľka 6.1: Parametre zdrojov optického žiarenia.

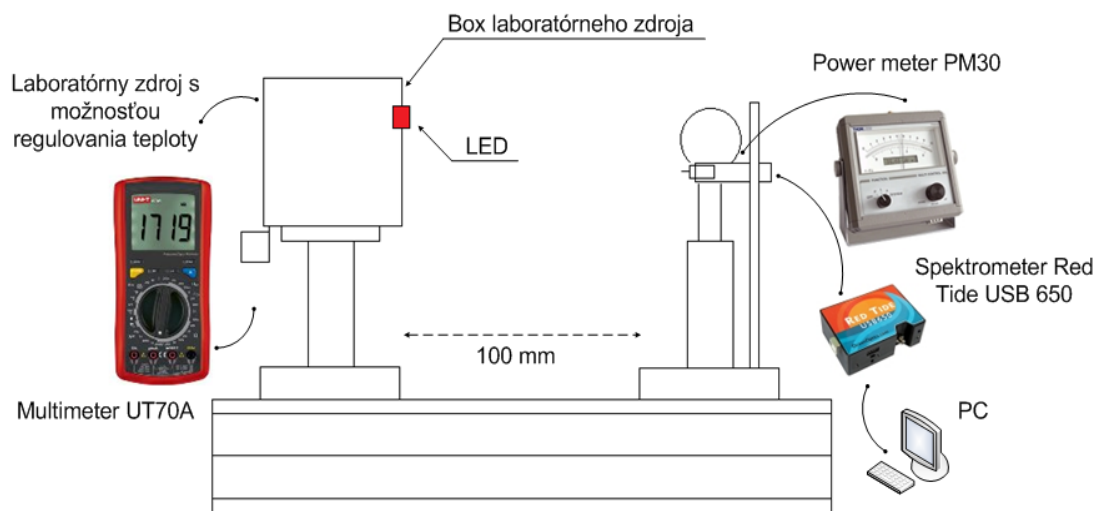
LED	Farba	Teplota farby / λ	I / Φ	I _F	U _F	2 _{1/2}
LXHLLB5C	modrá	470nm	48lm	700mA	84V	140°
LXHLMW1D	biela	4500-5500K	45lm	350mA	3,42V	140°
LXHLLLE5C	zelená	505nm	160lm	700mA	6,84V	140°
5AW4XCA	biela	7500-9500K	14000-16000mcd	20mA	3,6V	20°
OSM5DK5201A	biela	7500-9500K	43000-50000mcd	20mA	3,1V	8°
OSM5WK5201A	biela	4500-5500K	72000-80000mcd	20mA	3,1V	8°
SZW05A0A	biela	6300K	105lm	700mA	3,3V	120°
Z5P NEUTRAL	biela	3700-4200K	100lm	1000mA	3,3V	120°
STRF4-3528-W3	biela	2700-3300K	200lm	50mA	3,6V	120°

6.1 Návrh experimentálneho pracoviska

Pre uskutočnenie merania parametrov vybraných zdrojov optického žiarenia bolo nutné navrhnuť a zostaviť experimentálne pracovisko, ktoré umožnilo reguláciu teploty a prúdu pre potreby merania. Z dôvodu odlišného odberu prúdu výkonových LED a supersvietivých LED boli pri zostavení experimentálneho pracoviska použité dva zdroje. V ďalšej fáze merania bolo nutné navrhnuť druhé pracovisko, na ktorom bolo možné otestovať vyžarovacie charakteristiky jednotlivých LED.

6.1.1 Experimentálne pracovisko pre meranie optického výkonu, napätia a spektra

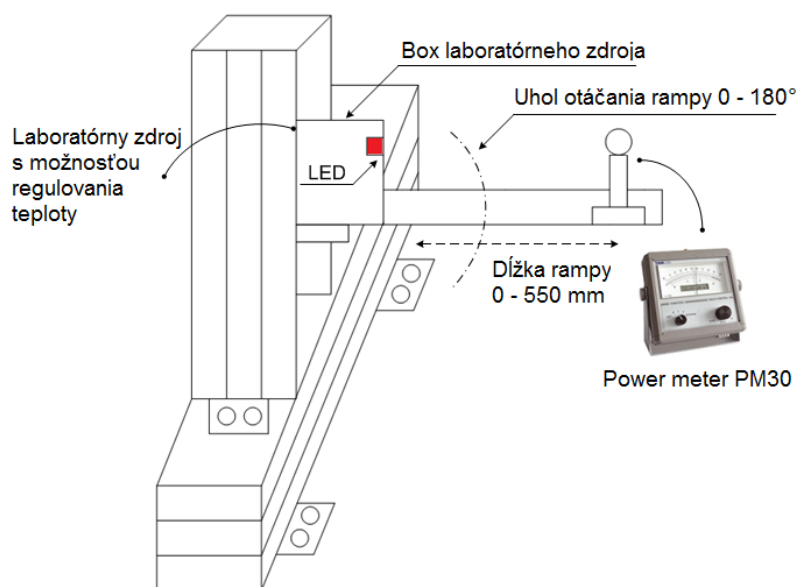
Základom celého experimentálneho pracoviska sú komponenty ThorLabs sady, pomocou ktorej som uchytal jednotlivé senzory a čidlá použitých meracích prístrojov. Ako zdroj napájania supersvietivých LED bol použitý laboratórny zdroj, ktorý bol schopný meniť hodnoty prúdu $I_F = 0 - 50 \text{ mA}$ so skokom 1 mA a teplotu okolia v rozmedzí $T_a = 25 - 50 \text{ °C}$. Z dôvodu vyšších odberov prúdu výkonových LED bol laboratórny zdroj v ďalšej fáze merania nahradený špeciálnym zariadením, ktoré dokázalo regulovať prúd až do hodnoty $I_F = 350 \text{ mA}$ so skokom 10 mA a teplotu okolia v rozmedzí $T_a = 25 - 50 \text{ °C}$. Vzdialenosť zdroja optického žiarenia od senzorov bola 100 mm . Zostavené experimentálne pracovisko bolo schopné zaznamenávať súčasne hodnoty optického výkonu, napätia a spektra LED. Výsledná zostava je zobrazená na obrázku 6.1.



Obrázok 6.1: Schéma experimentálneho meracieho pracoviska parametrov LED.

6.1.2 Experimentálne pracovisko pre meranie vyžarovacích charakteristík

Experimentálne pracovisko pre meranie vyžarovacej charakteristiky vybraných LED bolo zostavené v temnej miestnosti, aby boli dosiahnuté výsledky čo najpresnejšie. Ako zdroj napájania supersvietivých LED bol použitý laboratórny zdroj, ktorý bol schopný meniť hodnoty prúdu v rozmedzí $I_F = 0 - 50 \text{ mA}$ so skokom 1 mA pri lokálnej teplote $T_a = 25 \text{ °C}$. Pri výkonových LED bolo použité zariadenie, ktoré bolo schopné meniť hodnoty prúdu v rozmedzí $I_F = 0 - 350 \text{ mA}$ so skokom 10 mA pri lokálnej teplote $T_a = 25 \text{ °C}$. Konštrukcia pracoviska bolo navrhnutá a zhotovená tak, aby zdroj žiarenia bol umiestnený stacionárne a zároveň sa senzorová hlava power metra bola schopná pohybovať po rampe v priamom smere od zdroja optického žiarenia. Súčasne sa rampa s čidlom dokázala pohybovať v uhle $0 - 180^\circ$ od zdroja optického žiarenia. Na tento účel som pri zhotovení konštrukcie opäť použil ThorLabs sadu a jej jednotlivé komponenty. Výsledná zostava je zobrazená na obrázku 6.2.



Obrázok 6.2: Schéma experimentálneho meracieho pracoviska vyžarovacích charakteristík LED.

6.2 Namerané a dosiahnuté výsledky

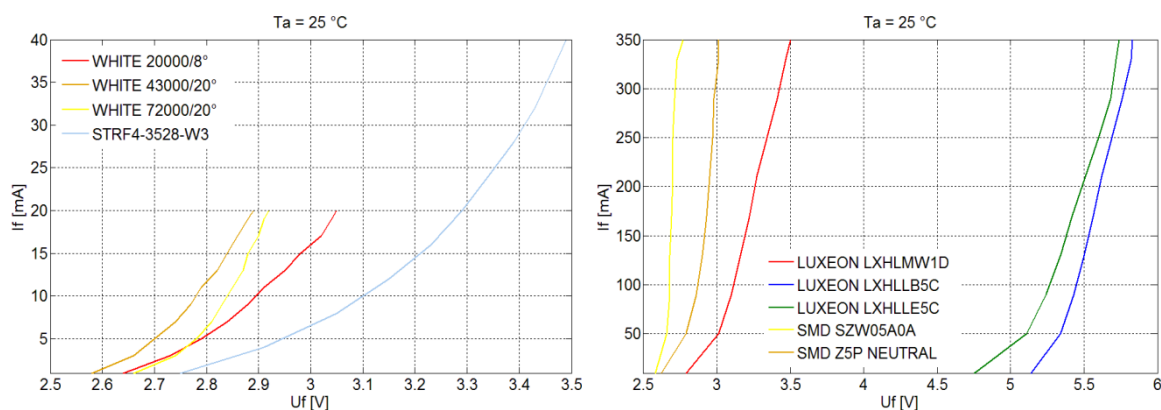
V rámci experimentálneho merania bolo u vybraných zdrojov optického žiarenia premeriavané napätie, optický výkon a spektrum. Tieto parametre boli premeriavané súčasne, aby boli výsledné hodnoty čo najpresnejšie. Počas meraní bola regulovaná teplota okolia v rozmedzí $T_a = 25 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zároveň sa reguloval aj pretekajúci prúd a to v rozmedzí $I_F = 10 - 350\text{ mA}$ u výkonových LED a v rozmedzí $I_F = 1 - 40\text{ mA}$ u supersvietivých LED. V ďalšej fáze merania sa zisťovala vyžarovacia charakteristika vybraných LED pri lokálnej teplote okolia $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2.1 Volt-Ampérova (VI) charakteristika

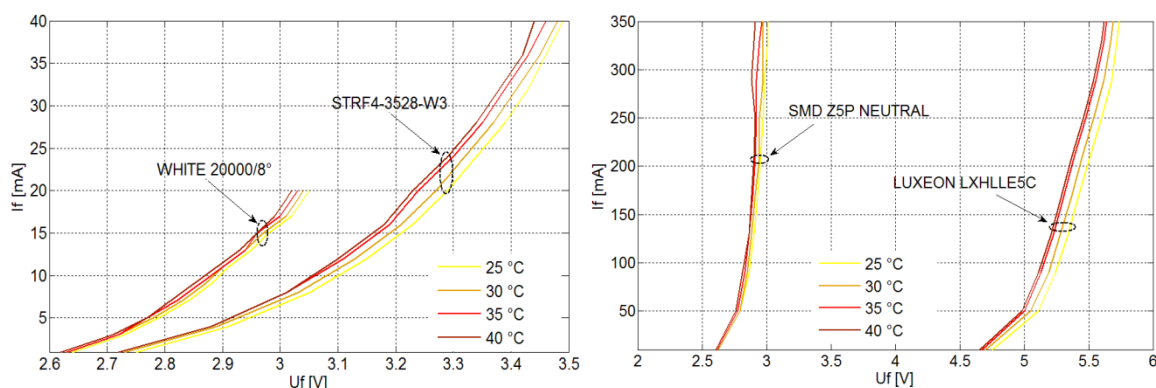
Volt-Ampérova charakteristika, ktorá je niekedy označovaná ako VI charakteristika, popisuje závislosť napätia U_F LED na pretekajúcom prúde I_F LED. Hodnoty napätia boli odčítavané z digitálneho multimetra UT720A, ktorý bol pripojený na box špeciálneho zariadenia, v ktorom bola umiestnená LED vo vzdialenosti 100 mm, viď obrázok 6.1.

Obrázok 6.3 zobrazuje volt-ampérové charakteristiky výkonových a supersvietivých LED (tabuľka 6.1) pri konštantnej teplote $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Namerané hodnoty sú v zásade o niečo nižšie ako hodnoty udávané výrobcom, viď tabuľka 6.1.

Na obrázku 6.4 je možné pozorovať citlivosť LED voči teplotnej zmene okolia v rozmedzí $T_a = 25 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z VI charakteristiky vyplýva, že k strmému nárastu prúdu dochádza už pri malej zmene napätia a zároveň so zvyšujúcou sa teplotou napätie takmer lineárne klesá.



Obrázok 6.3: Volt-Ampérova charakteristika supersvietivých a výkonových LED pri teplote $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



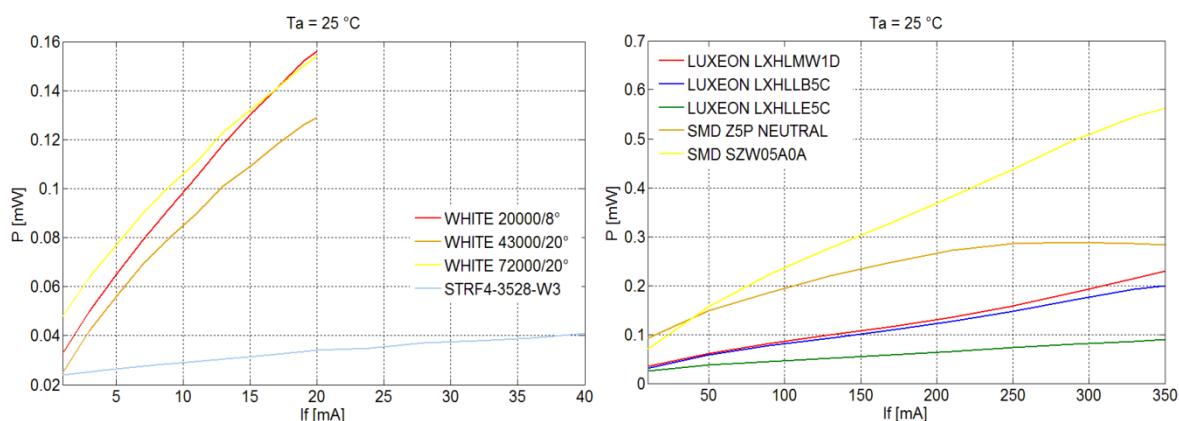
Obrázok 6.4: Závislosť VI charakteristiky vybraných LED na teplote okolia.

6.2.2 Prevodová (PI) charakteristika

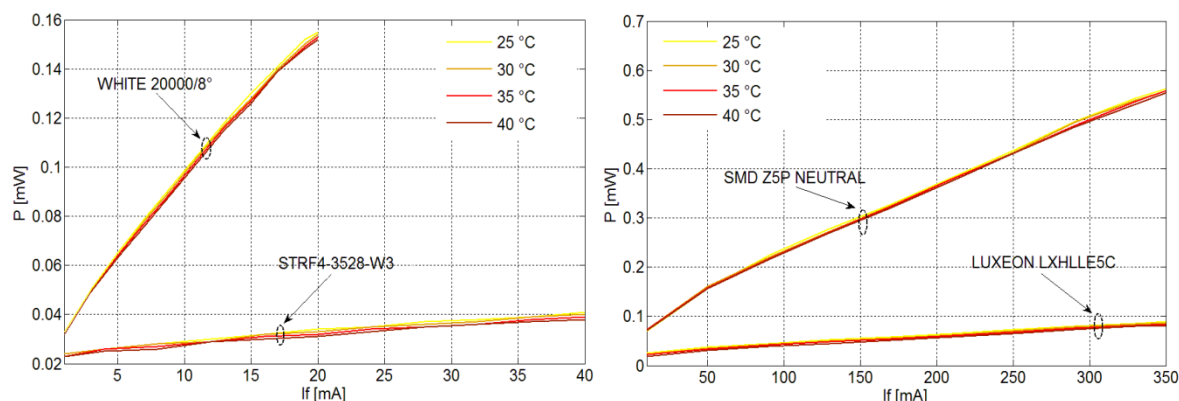
Prevodová charakteristika, ktorá je tiež označovaná ako PI charakteristika, popisuje závislosť optického výkonu P na pretekajúcom prúde I_F LED. Hodnoty optického výkonu boli odčítavané z power metra PM30, ktorého senzorová hlava S120B bola umiestnená vo vzdialenosti 100 mm v priamom smere od zdroja optického žiarenia, vid' obrázok 6.1. Počas merania bola premeriavaná aj hodnota vyžarovacieho spektra ovplyvňujúca vlnovú dĺžku a tým aj hodnotu optického výkonu.

Obrázok 6.5 zobrazuje prevodové charakteristiky výkonových a supersvietivých LED (tabuľka 6.1) pri konštantnej teplote $T_a = 25^\circ\text{C}$. Z prevodových charakteristík vyplýva, že najvyššiu hodnotu optického výkonu dosahujú výkonové a SMD LED pri pretekajúcom prúde $I_F = 350\text{ mA}$, a to hodnoty do 2,8 W. Supersvietivé LED dosahujú pri pretekajúcom prúde $I_F = 20\text{ mA}$ nižšie hodnoty optického výkonu, a to do 0,1 W. Hodnoty sú udávané výrobcom a pri experimentálnom meraní dosahujú nižšie hodnoty z dôvodu väčšej vzdialenosti čidla od zdroja optického žiarenia.

Na obrázku 6.6 je možné pozorovať citlivosť LED voči teplotnej zmene okolia v rozmedzí $T_a = 25 - 40^\circ\text{C}$. Výsledkom merania je zistenie, že optický výkon v závislosti od zvyšujúcej sa teploty takmer lineárne klesá.



Obrázok 6.5: Prevodová charakteristika supersvietivých a výkonových LED pri teplote 25°C .



Obrázok 6.6: Závislosť PI charakteristiky vybraných LED na teplote okolia.

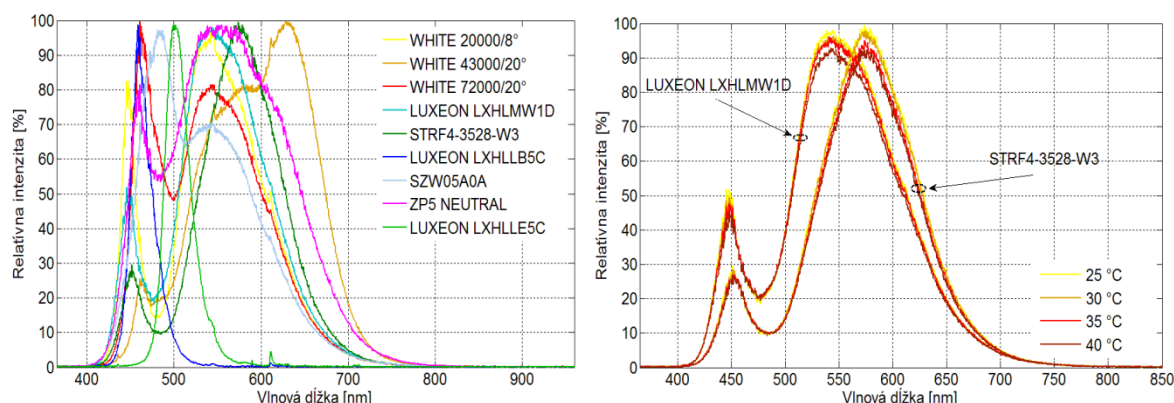
6.2.3 Spektrálna charakteristika

Meranie spektrálnej charakteristiky vybraných LED zdrojov optického žiarenia (tabuľka 6.1) prebiehalo v temnej miestnosti za pomoci spektrometra Red Tide USB650 s obslužným programom

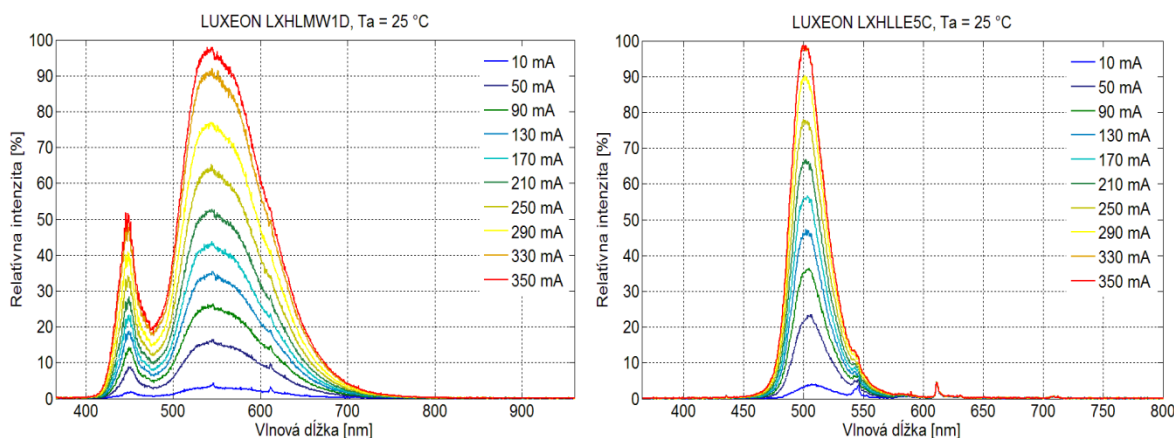
Safibra DAS 2.0. Čidlo spektrometra bolo umiestnené v priamom smere od zdroja optického žiarenia vo vzdialenosti 100 mm, vid' obrázok 6.1. Pred začatím merania sa pri každej LED otestovala veľkosť intenzity spektra pri lokálnej teplote a maximálnom prúde, aby nedochádzalo k prekročeniu rozsahu.

Obrázok 6.7 zobrazuje spektrálne charakteristiky vybraných LED (tabuľka 6.1) pri lokálnej teplote 25 °C. Na výslednej charakteristike môžeme vidieť biele LED s dvoma vlnovými dĺžkami pre oblasť luminiscencie ktorú vyžaruje čip, a fosforescencie, ktorú vyžaruje nanosený žltý luminoфор. Rovnako je tu zastúpená LED s vlnovou dĺžkou 520 nm, čo zodpovedá zelenej farbe a LED s vlnovou dĺžkou 450 nm, čo zodpovedá farbe modrej. Teplejšie biele LED majú potlačenú oblasť spektra v oblasti modrého čipu (okolo 450 nm) a dominantnú oblasť v rozmedzí od 500 nm až 700 nm. Studensšie biele LED majú naopak potlačenú oblasť fosforescencie (okolo 550 nm) a dominantnú oblasť v rozmedzí od 450 nm až do 500 nm. Zároveň je na nasledujúcom grafe možné vidieť zmenu vyžarovaného spektra LED pri zmene teploty okolia v rozsahu $T_a = 25 - 40$ °C. Výsledné spektrum vplyvom zvyšujúcej sa teploty znižuje svoju intenzitu, pričom nedochádza k žiadnej deformácii tvaru spektra. Môžeme teda konštatovať, že použitý luminoфор na vybraných LED je teplotne stály.

Na obrázku 6.8 je zobrazená zmena spektrálnej charakteristiky výkonovej LED LUXEON LXHLMW1D a LUXEON LXHLL5C v závislosti na zmene prúdu I_F pri lokálnej teplote 25 °C.



Obrázok 6.7: Spektrálne charakteristiky vybraných LED pri lokálnej teplote 25 °C a pri zmene teploty.

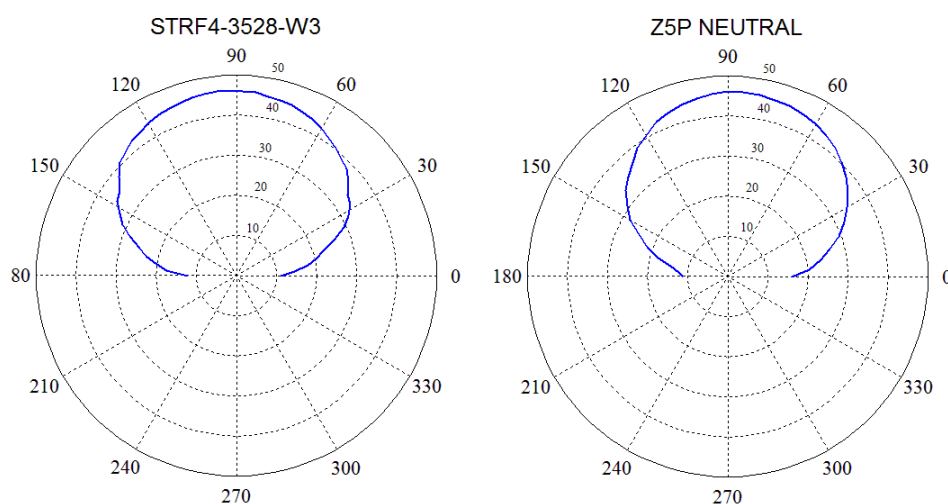


Obrázok 6.8: Spektrálna charakteristika vybraných výkonových LED v závislosti na zmene prúdu I_F pri lokálnej teplote 25 °C.

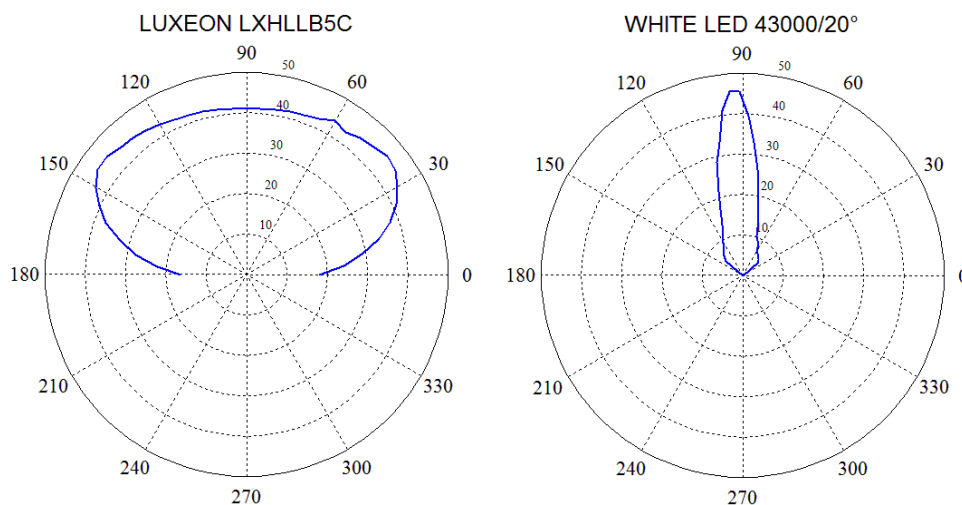
6.2.4 Vyžarovacia charakteristika

Vyžarovacia charakteristika vybraných LED zdrojov optického žiarenia (tabuľka 6.1) bola premeriavaná pri teplote okolia $T_a = 25\text{ °C}$ v tmavej miestnosti. Za pomoci experimentálneho pracoviska zostrojeného pre meranie vyžarovacích charakteristík bolo možné zaznamenávať hodnoty výkonu a súčasne meniť vzdialenosť a uhol sensorovej hlavy S120B od zdroja optického žiarenia, viď obrázok 6.2. Na začiatku merania bola stanovená u jednotlivých LED vymedzovacia vzdialenosť vyžarovania pri stanovenom výkone. V ďalšej fáze sa tento výkon dodržiaval pri zmene uhla rampy v rozmedzí $0 - 180^\circ$ so skokom 4° za pomoci zmeny vzdialenosti sensorovej hlavy S120B od zdroja optického žiarenia. Súčasne sa hodnoty vzdialenosti čidla a uhol natočenia rampy zaznamenávali.

Obrázok 6.9 a 6.10 zobrazuje vyžarovacie charakteristiky vybraných výkonových a supersvietivých LED pri teplote okolia $T_a = 25\text{ °C}$. SMD LED Z5P NEUTRAL a STRFF4-3528-W3 vyžarujú v uhle 120° . Výkonová LED LUXEON LXHLLB5C vyžaruje v uhle 140° a supersvietivá WHITE LED 43000 vyžaruje v uhle 8° .



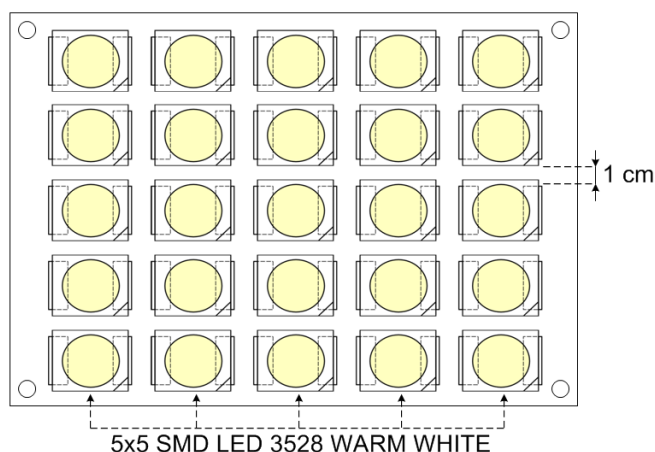
Obrázok 6.9: Vyžarovacia charakteristika SMD Z5P NEUTRAL a STRF4-3528-W3 pri teplote okolia $T_a = 25\text{ °C}$.



Obrázok 6.10: Vyžarovacia charakteristika LUXEON LXHLLB5C a WHITE LED 43000/8° pri teplote okolia $T_a = 25\text{ °C}$.

7 Návrh systému mikrobuniek pre optickú bezvláknovú sieť v rámci miestnosti

Návrh systému mikrobuniek pre optickú bezvláknovú sieť v rámci miestnosti sa realizoval prostredníctvom simulácii v prostredí MATLAB a LightTools. S využitím týchto dvoch programov sa definoval optický zdroj žiarenia, elementy ovplyvňujúce optické žiarenie a miestnosť, v ktorej bol zdroj simulovaný, pričom sa vychádzalo z reálnych hodnôt dosiahnutých pri experimentálnom meraní. Použitý LED zdroj pozostáva z matice o veľkosti 5×5 SMD LED 3528, kde každý optický zdroj je od seba vzdialený 1 cm, viď obrázok 7.1. Spomínaná SMD LED vyžaruje na vlnovej dĺžke 450 nm pre oblasť modrej luminiscencie a 575 nm pre oblasť fosforescencie, takže ide o teplú bielu LED. Výkon jednej LED je $P = 8,5 \text{ mW}$ pri pretekajúcom prúde $I_F = 32 \text{ mA}$ a vyžarovacom uhle 120° . Elementy ovplyvňujúce optické žiarenie a návrh miestnosti vychádzal zo skutočných parametrov laboratória telekomunikačnej techniky (temná miestnosť).



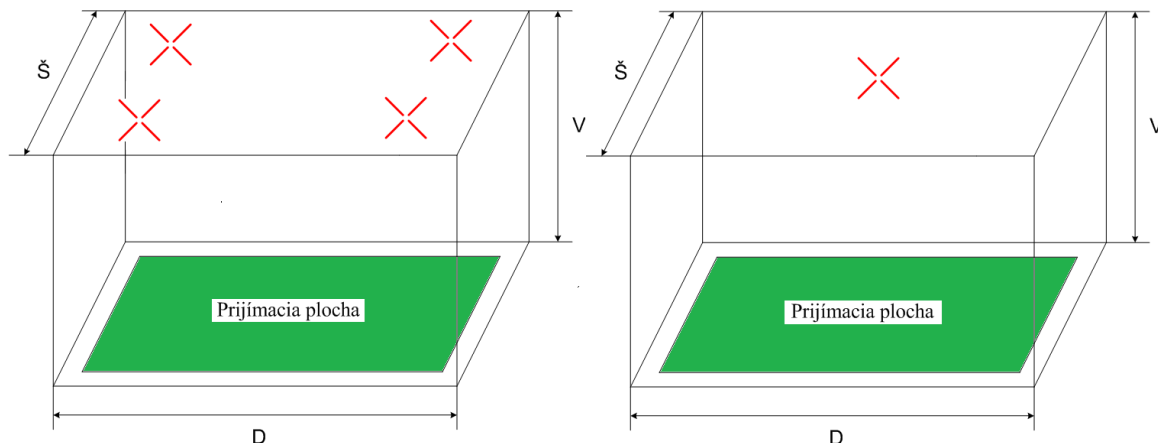
Obrázok 7.1: Návrh svetelnej matice (5×5 LED).

7.1 Simulácia systému mikrobuniek v programe MATLAB a LightTools

Základom simulácií v oboch programoch bolo okrem navrhnutia optického zdroja aj definovanie experimentálnej miestnosti, ktorá vychádzala z reálnych parametrov laboratória telekomunikačnej techniky (temná miestnosť). Rozmery miestnosti boli prednastavené na šírku 2 m, dĺžku 3,4 m a výšku 2,2 m, viď obrázok 7.2. Vnútorne steny temnej miestnosti sú vyrobené zo svetlo neodrážajúceho čierneho materiálu a miestnosť neobsahuje žiadne predmety ani prekážky. Z tohto dôvodu sa pri návrhu miestnosti vychádzalo z predpokladu, že sa svetlo v miestnosti neodráža, a teda hodnota odrazivosti od elementov nebola definovaná. Komunikačný kanál vo vnútri miestnosti teda tvorí iba optické žiarenie šíriace sa priamou cestou od vysielača k prijímaču bez odrazov (LOS). Výsledný prijatý optický výkon môžeme potom vyjadriť už spomínaným vzťahom, viď (5.3). Pretože v simulácii nie je použitý optický filter ani optický koncentrátor, vyjadri sa rovnomerný zisk priamej optickej trasy H_d vzťahom (7.1).

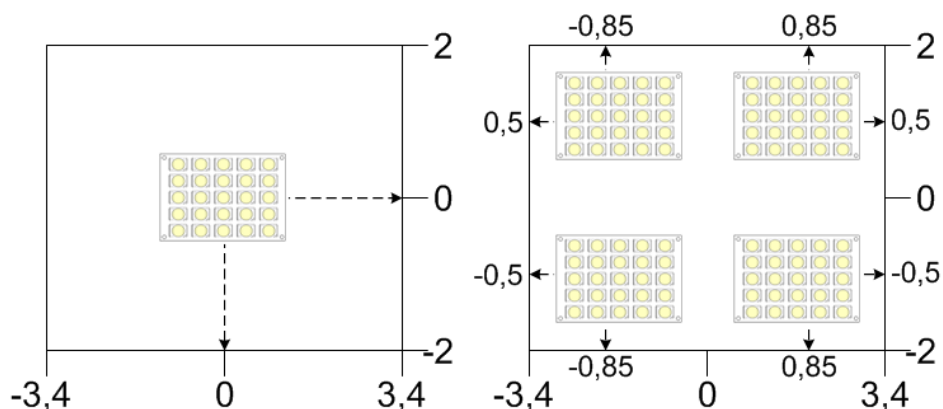
$$H_d(0) = \left\{ \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) \cos(\Psi) \right. \quad (7.1)$$

Vo vzťahu Ψ predstavuje uhol medzi normálou kolmou na prijímaciu oblasť fotodiódy a dopadajúcim optickým žiarením, Ψ_c je medzný uhol príjmu fotodiódy a A_{pd} je oblasť príjmu fotodiódy.



Obrázok 7.2: Schéma miestnosti pre simuláciu jednej a štyroch svetelných matic LED (dĺžka 3,4 m, šírka 2 m a výška 2,2 m).

Pri simuláciách boli použité dve varianty umiestnenia svetelnej matice LED, vid' obrázok 7.2. Pri prvej simulácii bola použitá jedna svetelná matica, ktorá bola umiestnená v strede miestnosti na stropu výšky 2,2 m. Toto umiestnenie svetelnej matice bolo odsimulované z dôvodu potreby porovnania výsledkov simulácie s reálnymi hodnotami dosiahnutými v temnej miestnosti. Pre ideálne pokrytie miestnosti bola navrhnutá ďalšia simulácia, ktorá pracovala so štyrmi svetelnými maticami umiestnenými v rohoch miestnosti na stropu výšky 2,2 m, vid' obrázok 7.3. Prijímacia plocha bola v simuláciách nastavená na rozlohu celej miestnosti vo výške 0,75 m, pričom optický bezvláknový kanál mal dĺžku 1,45 m.



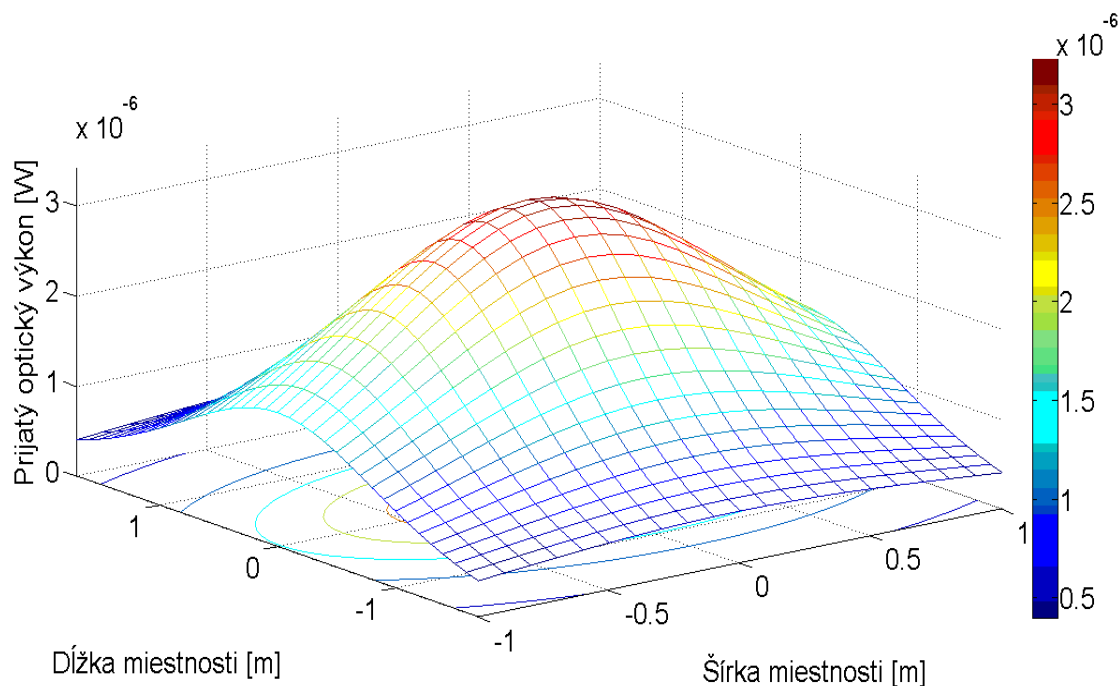
Obrázok 7.3: Rozmiestnenie svetelných matic LED v priestore.

7.1.1 Simulácia v programe MATLAB

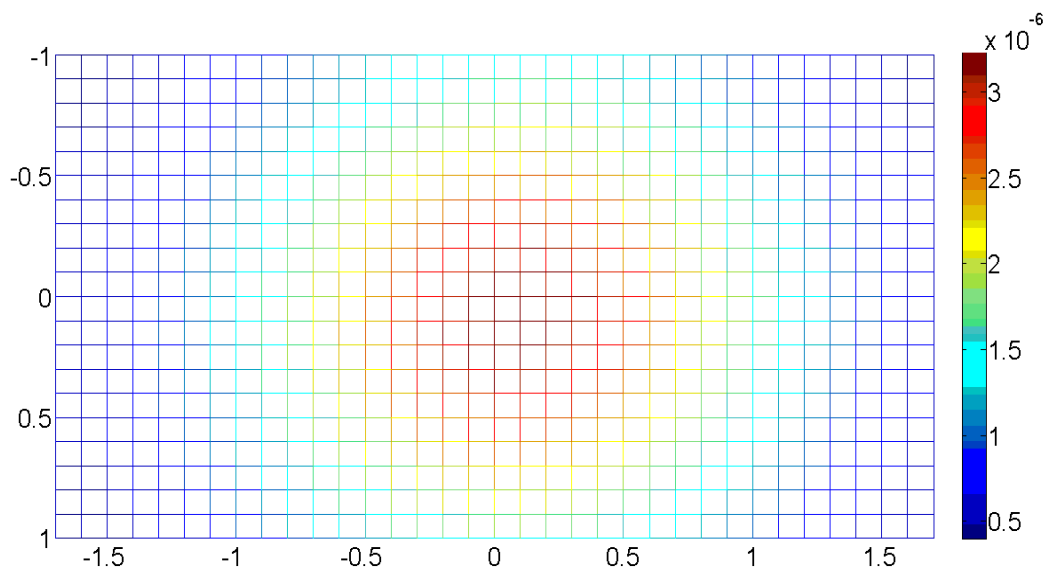
Program MATLAB je integrované prostredie pre vedeckotechnické výpočty, modelovanie, návrhy algoritmov, simulácie, analýzu a prezentáciu dát, návrhy komunikačných a riadiacich systémov. Tento výpočtový systém sa stal počas posledných pár rokov celosvetovým štandardom v oblasti technických výpočtov a simulácii. MATLAB poskytuje nielen grafické a výpočtové nástroje, ale aj rozsiahle špecializované knižnice funkcií spolu s výkonným programovacím jazykom štvrtej generácie.

Najpodstatnejšou časťou programu sú algoritmy pre operácie s maticami a grafika umožňujúca jednoduché zobrazenie výsledkov získanými výpočtom.

Simulácia v tomto programe bola realizovaná pomocou príkazov a funkcií v MATLAB kóde. Priamo v tomto kóde sa definovali jednotlivé parametre vysielача, prijímača, optického kanála a miestnosti. V prvej časti sa nastavili parametre optického vysielача (výkon, uhol vyžarovania, veľkosť čipu) a zároveň aj veľkosť a rozloženie svetelnej matice, viď obrázok 7.1. Následne sa definovali rozmery miestnosti, dĺžka optického kanála a súradnice umiestnenia svetelnej matice, viď obrázok 7.3. Posledná časť kódu nastavuje parametre optického prijímača vrátane jeho veľkosti a umiestnenia. MATLAB následne spracoval vložené parametre a výsledok zobrazil v 3D grafe.

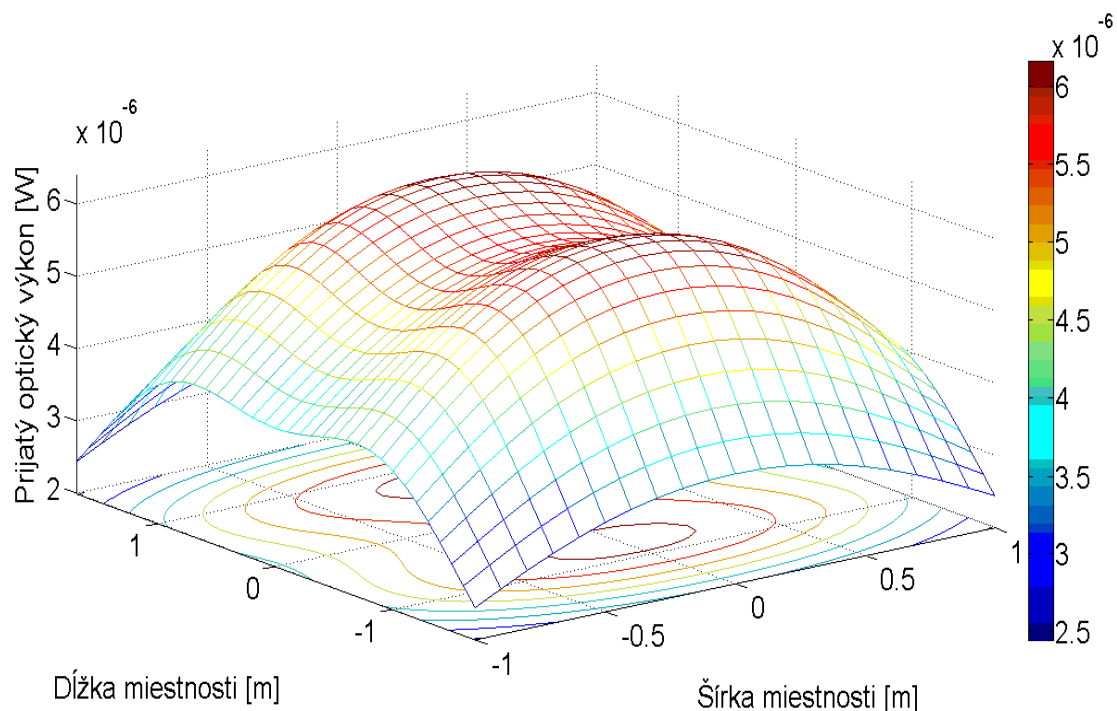


Obrázok 7.4: Simulácia jednej svetelnej matice v programe MATLAB.

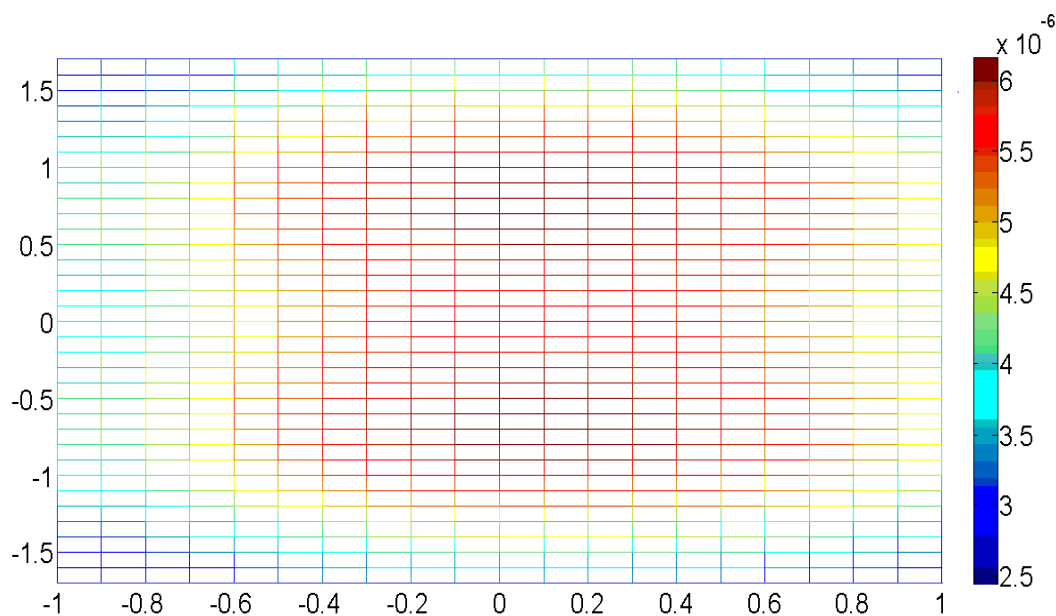


Obrázok 7.5: Simulácia jednej svetelnej matice v programe MATLAB (pohľad zhora).

Obrázok 7.4 a 7.5 zobrazuje simuláciu jednej svetelnej matice umiestnenej na stred miestnosti v programe MATLAB. Pri tomto umiestnení osvetľuje svetelná matica hlavne stred miestnosti o veľkosti plochy 2 m^2 pri výkone $3,21 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-6}\text{ W}$. Zároveň takto umiestnený zdroj nedostatočne osvetľuje krajné časti miestnosti. Na základe grafu môžeme teda zhodnotiť, že použitie jednej svetelnej matice je pre osvetlenie celej miestnosti nedostačujúce.



Obrázok 7.6: Simulácia štyroch svetelných matíc v programe MATLAB.



Obrázok 7.7: Simulácia štyroch svetelných matíc v programe MATLAB (pohľad zhora).

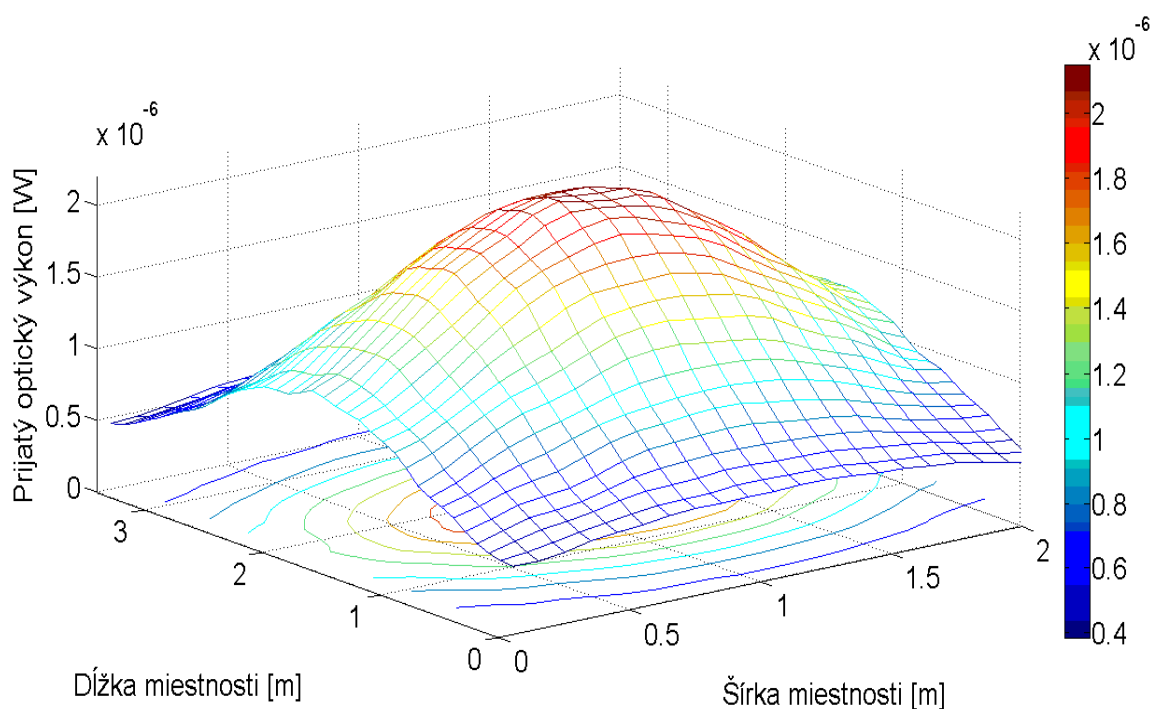
Na obrázku 7.6 a 7.7 je možné vidieť simuláciu štyroch svetelných matíc umiestnených v rohoch miestnosti v programe MATLAB. Takto umiestnené svetelné matice pokrývajú celý priestor

miestnosti s výkonom $6,2 \cdot 10^{-6} - 3,2 \cdot 10^{-6}$ W. Na základe grafu môžeme zhodnotiť, že použitie štyroch svetelných matíc dokáže dostatočne pokryť celý priestor, a teda takéto rozloženie a počet svetelných matíc je vhodný pre osvetlenie celej miestnosti.

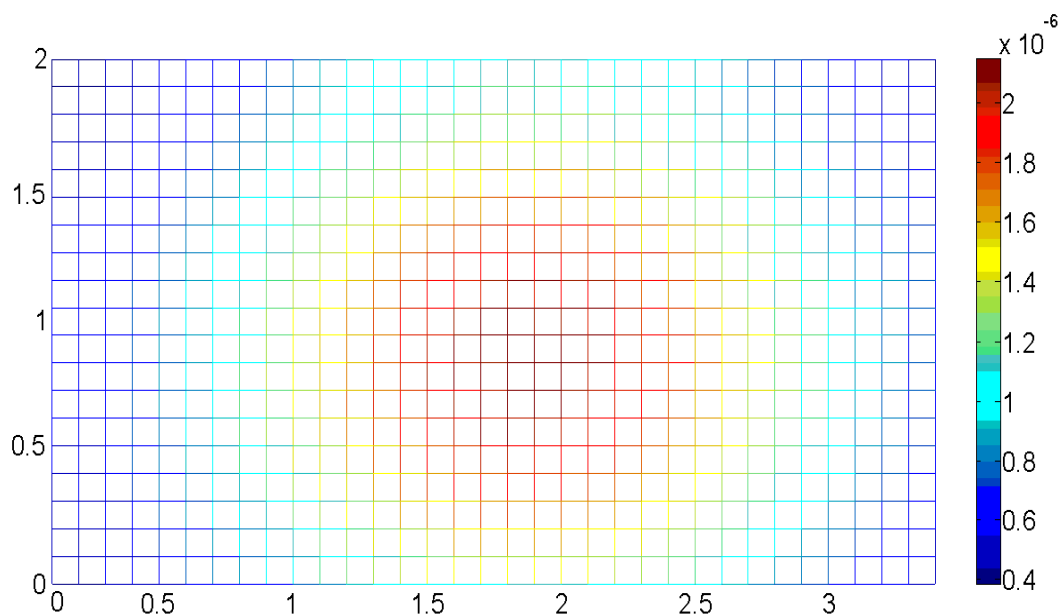
7.1.2 Simulácia v programe LightTools

Program LightTools predstavuje elegantný systém modelovania súplnou optickou presnosťou a precíznosťou. Ponúka jedinečný dizajn a analytické možnosti v kombinácii s jednoduchým použitím. Zároveň podporuje rýchly návrh a automatický systém optimalizácie, ktorý umožňuje uskutočniť návrh osvetlenia podľa preddefinovaných špecifikácií. Konštrukcia a simulácia sa realizuje priamym vložení jednotlivých 3D komponentov do modelu. Tieto komponenty môžu mať premenlivú veľkosť, polohu a orientáciu. Program tiež umožňuje užívateľovi nastaviť veľké množstvo optických povrchov pre rôzne geometrické objekty. Knižnice LightToolu súčasne obsahujú veľké množstvo rôznych optických zdrojov, materiálov a šošoviek. Rovnako program umožňuje importovanie hotových modelov z iných CAD softvérov.

Simulácia v programe LightTools prebehla v plnom grafickom režime s podporou priameho vkladania jednotlivých 3D komponentov do modelu. V prehľadnom dizajne sa postupne nastavili parametre vysieláča, prijímača, optického kanála a miestnosti. Pri návrhu optického vysieláča sa využili knižnice programu, ktoré obsahujú preddefinované vlastnosti použitej LED (puzdro, vyžarovací uhol). Súčasne sa nastavil optický výkon LED a priamo do modelu sa nahralo vyžarovacie spektrum zistené pri experimentálnom meraní, vid' obrázok 6.7. Následne sa definovali rozmery miestnosti a optický vysieláč sa umiestnil na potrebné súradnice, vid' obrázok 7.2 a 7.3. V poslednej časti sa nastavila veľkosť a umiestnenie optického prijímača a elementy ovplyvňujúce optický kanál. Program následne spracoval navrhnutý model a výstupný súbor bol prevedený pomocou MATLABu do 3D grafu.

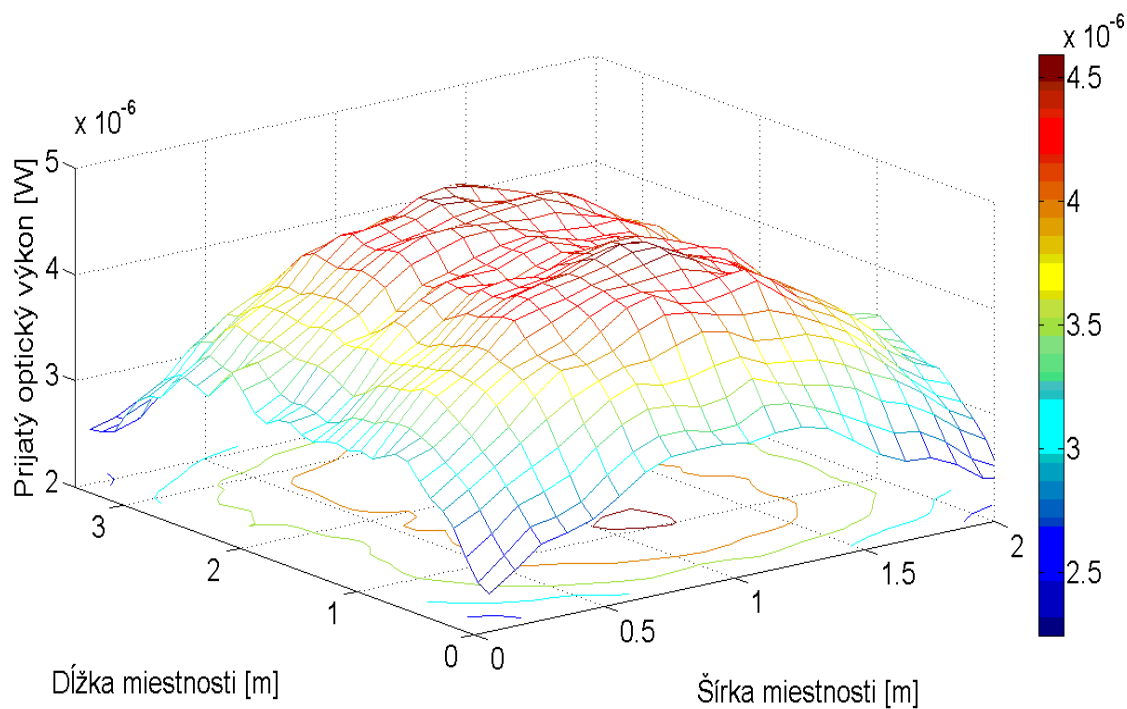


Obrázok 7.8: Simulácia jednej svetelnej matice v programe LightTools.

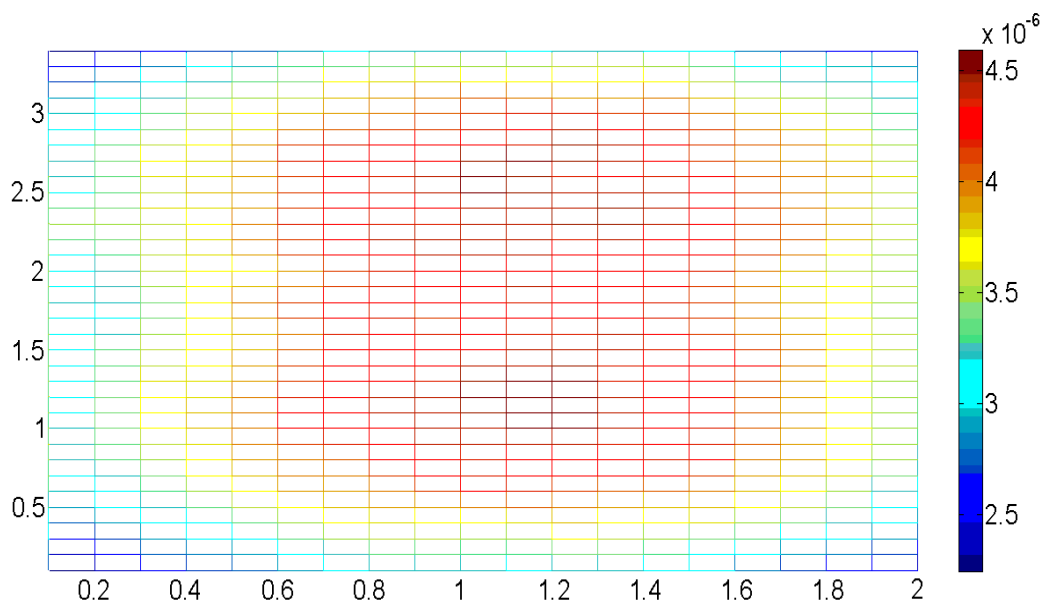


Obrázok 7.9: Simulácia jednej svetelnej matice v programe LightTools (pohľad zhora).

Obrázok 7.8 a 7.9 zobrazuje simuláciu jednej svetelnej matice umiestnenej na stred miestnosti v programe LightTools. Pri tomto umiestnení osvetľuje svetelná matica hlavne stred miestnosti o veľkosti plochy 2m^2 pri výkone $2,14 \cdot 10^{-6} - 1,4 \cdot 10^{-6}\text{W}$. Výsledkom simulácie je zistenie, že takto umiestnená svetelná matica nedostatočne osvetľuje krajné priestory miestnosti. Z tohto dôvodu je použitie jednej svetelnej matice umiestnenej na stred miestnosti pre pokrytie celého priestoru nevhodné.



Obrázok 7.10: Simulácia štyroch svetelných matíc v programe LightTools.



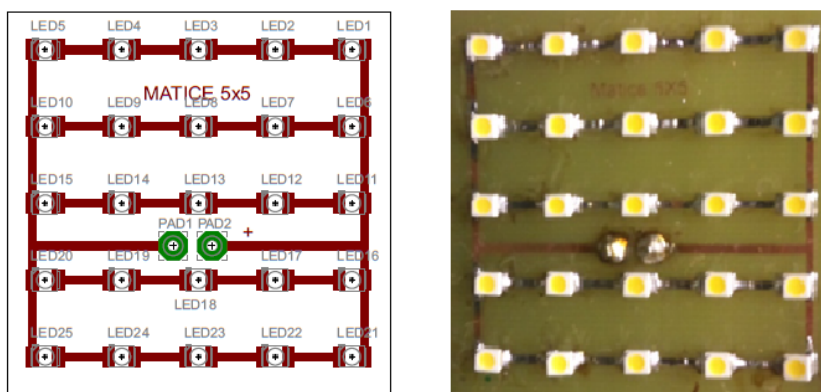
Obrázok 7.11: Simulácia štyroch svetelných matíc v programe LightTools (pohľad zhora).

Na obrázku 7.10 a 7.11 je možné vidieť simuláciu štyroch svetelných matíc umiestnených v rohoch miestnosti v programe LightTools. Takto umiestnené svetelné matice pokrývajú celý priestor miestnosti s výkonom $4,6 \cdot 10^{-6}$ – $3,3 \cdot 10^{-6}$ W. Výsledkom simulácie je zistenie, že umiestnenie svetelných matíc týmto spôsobom dostatočne osvetľuje celý priestor miestnosti. Použitie štyroch svetelných matíc umiestnených v rohoch miestnosti je teda vhodné na osvetlenie celého priestoru.

Simulácie v programe MATLAB a LightTools prebehli pri rovnakých vstupných parametroch vysieláča, prijímača, optického kanála a miestnosti. Výsledné modely z oboch programov sa od seba nepatrne líšia v hodnote výkonu a rozsahu pokrytia miestnosti. Táto skutočnosť je spôsobená odlišným definovaním vzdialenosti u jednotlivých bodov v svetelnej matici. Program MATLAB neumožňoval nastaviť vzdialenosť medzi jednotlivými LED v svetelnej matici a ukladal ich priamo vedľa seba. LightTools na rozdiel od MATLABu podporoval presné definovanie vzdialenosti medzi jednotlivými LED v navrhovanej svetelnej matici a zároveň umožňoval priame nahratie vyžarovacieho spektra použitej LED. Tento fakt spôsobil, že modely z programu LightTools pokrývajú rozsiahlejšiu časť miestnosti pri rovnakých parametroch z dôvodu širšieho usporiadania LED v použitej svetelnej matici. V konečnom dôsledku sú modely z programu LightTools presnejšie, pretože program umožňuje priame vloženie spektrálnej charakteristiky, puzdra LED a zároveň umožňuje presné navrhnutie svetelnej matice, čím ponúka možnosť dosiahnutia reálnejších podmienok pri simulácii [21][22].

8 Rozloženie svetla v priestore

Rozloženie svetla v priestore bolo testované v laboratóriu telekomunikačnej techniky (temná miestnosť). Táto miestnosť má šírku 2 m, dĺžku 3,4 m a výšku 2,2 m, vid' obrázok 7.2. Vnútorne steny miestnosti sú vyrobené zo svetlo neodrážajúceho čierneho materiálu a miestnosť neobsahuje žiadne predmety ani prekážky, takže hodnoty odrazivosti od elementov v miestnosti sú zanedbateľné. Optický komunikačný kanál medzi vysielačom a prijímačom teda tvorí iba optické žiarenie šíriace sa priamou cestou bez odrazov (LOS). Ako optický vysielač bola použitá navrhnutá svetelná matica o veľkosti 5×5 LED, vid' obrázok 8.1. Svetelnú maticu tvoria SMD LED 3528, ktoré boli vybrané na základe experimentálneho merania parametrov z predchádzajúcej časti práce. Rozsah vstupného napätia matice je 15 – 17,5 V, prúd 150 mA a výkon 2,625 W. Optický vysielač bol umiestnený v strede miestnosti, vid' obrázok 7.3, na stope výšky 2,2 m. Napájanie svetelnej matice zabezpečoval laboratórny zdroj Diametral P230R51D.

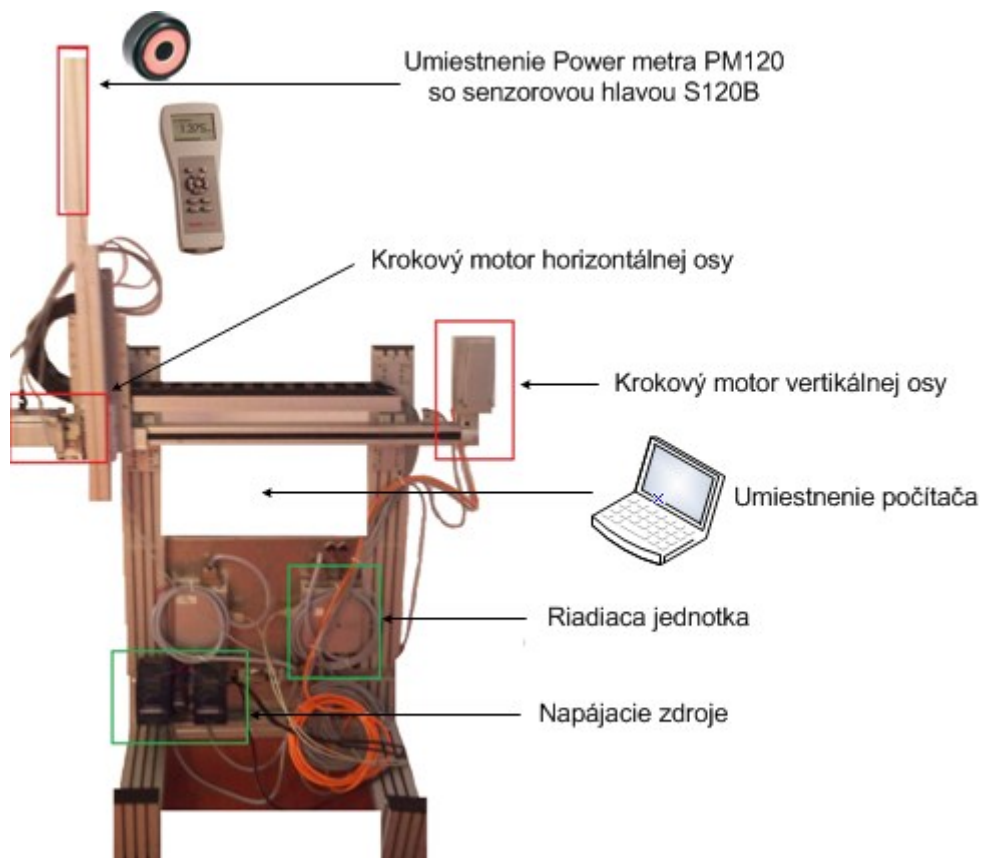


Obrázok 8.1: Svetelná matica 5×5 LED ($25 \times$ SMD LED 3528).

Ako prijímač optického výkonu bol použitý power meter ThorLabs PM120 so senzorovou hlavou S120B (rozsah 50 nW až 50 mW, pracujúci na vlnovej dĺžke $\lambda = 400 \text{ nm} - 1100 \text{ nm}$), ktorý bol počas merania nastavený na dominantnú vlnovú dĺžku použitej svetelnej matice. Táto vlnová dĺžka bola zistená pri testovaní parametrov jednotlivých LED, vid' obrázok 6.7. Power meter spolu so senzorovou hlavou S120B bol umiestnený na pohyblivom ramene prístroja FESTO, ktorý bol pripojený k PC cez rozhranie RS232. Pohyb ramena zariadenia je ovládaný za pomoci jedného krokového motora pre horizontálnu os a jedného motora pre os vertikálnu, vid' obrázok 8.2.

8.1 Zariadenie FESTO

Prístroj FESTO je napájaný tromi zdrojmi. Dva výkonové zdroje 24VDC/10A zabezpečujú dostatočné napájanie pre motory a jeden 24VDC/2A napája riadiacu časť. Každý z výkonových zdrojov je pripojený k jednej riadiacej jednotke, ktorá následne prenáša napájanie k motoru. Pre riadenie zariadenia je vyčlenený tretí zdroj, ktorý napája obe riadiace jednotky súčasne. Riadenie motorov zabezpečujú riadiace jednotky firmy FESTO s označením CMMS-ST-C8-7-G2. Tieto jednotky umožňujú ovládanie počítačom cez zabodované porty RS-232. Prepojenie motora s riadiacimi jednotkami je realizované prostredníctvom špeciálnych káblov firmy FESTO. Komunikácia so zariadením prebieha prostredníctvom sériovej linky [23].



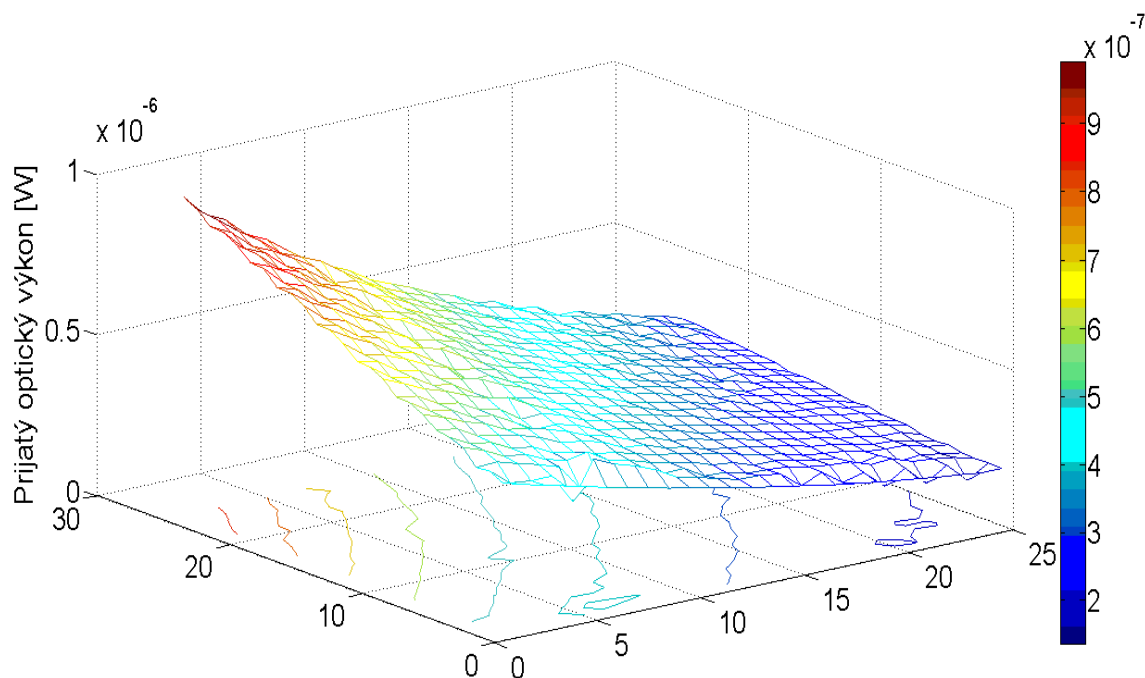
Obrázok 8.2: Prístroj FESTO s pohyblivým ramenom na ktorom je umiestnený power meter PM120 a senzorová hlava S120B.

Pre potreby merania bol prístroj FESTO umiestnený vo vodorovnej polohe. Týmto spôsobom bola senzorová hlava power metra S120B umiestnená 75 cm nad úrovňou podlahy, čo zodpovedá klasickej výške stola. Takto umiestnené zariadenie bolo však nestabilné a preto ho bolo nutné vystužiť podložnými vzperami, vid' obrázok 8.3.

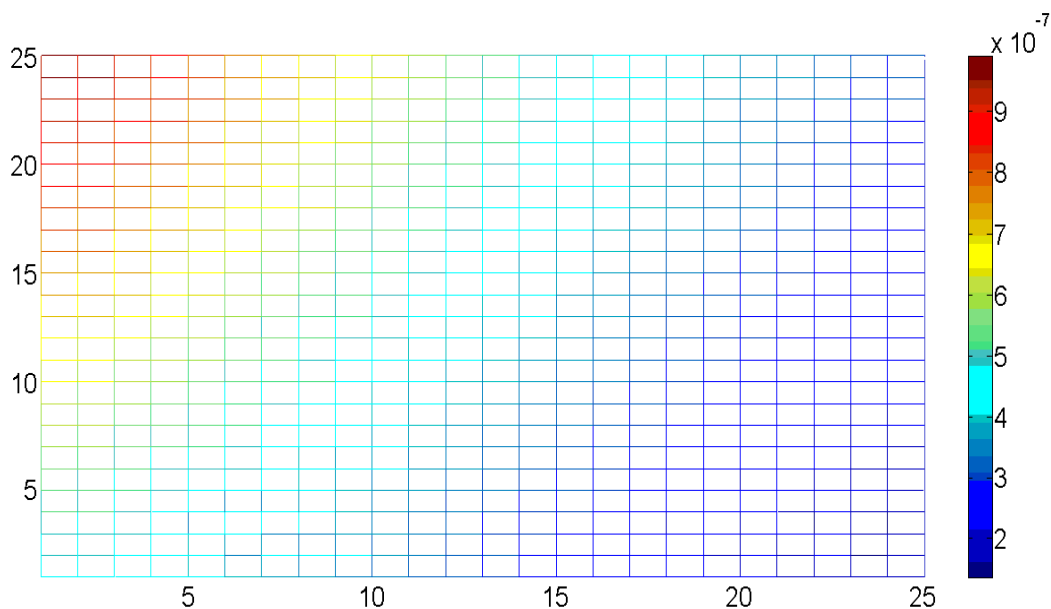


Obrázok 8.3: Prístroj FESTO s pohyblivým ramenom umiestnený vo vodorovnej polohe [24].

optického výkonu na 25 mm. Pre obmedzenie kmitania ramena bola hodnota dĺžky zastavenia nastavená na hodnotu 1 s. Po nastavení jednotlivých parametrov bolo nutné postupne inicializovať všetky porty a v prípade nutnosti pomocou nástroja homing vrátiť rameno prístroja do základného stavu. Následne prístroj začne postupne prechádzať horizontálnu a vertikálnu os a po ukončení merania zobrazí výsledok vo forme 3D grafu, vid' obrázok 8.5 a 8.6.



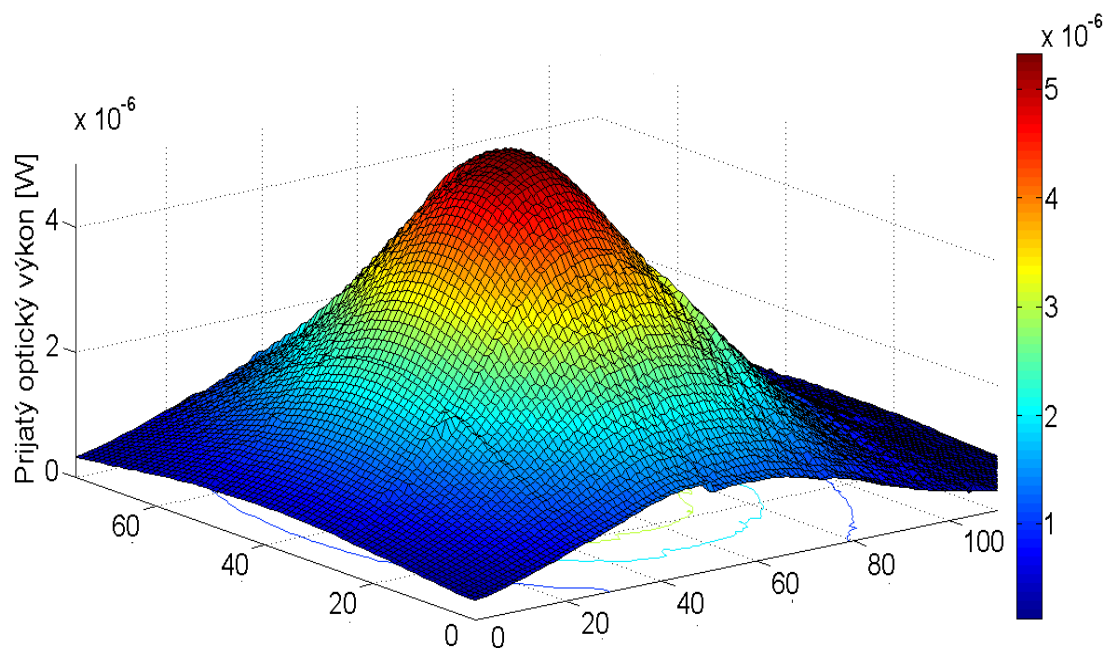
Obrázok 8.5: Ukážka výstupu z aplikácie v programe MATLAB (pozícia č.3, vid' obr.8.4).



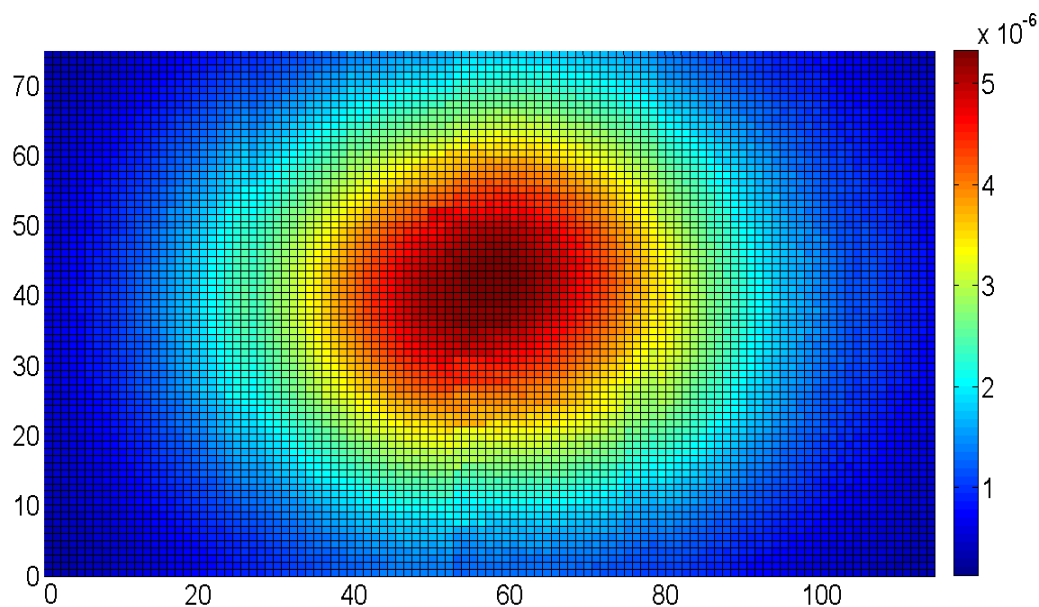
Obrázok 8.6: Ukážka výstupu z aplikácie v programe MATLAB (pohľad zhora).

8.3 Výsledné rozloženie svetla v priestore temnej miestnosti

Cieľom tejto časti práce bolo otestovať rozloženie svetla v priestore laboratória telekomunikačnej techniky (temná miestnosť) a porovnanie výsledkov so simulovanými hodnotami získanými v programe MATLAB a LightTools. Pri meraní boli použité rovnaké vstupné parametre ako pri simuláciách. Výsledkom merania bolo 15 nameraných matíc (25x25), ktoré sa spracovali do jednej výslednej matice o veľkosti 75x125. Táto matica bola následne spracovaná v programe MATLAB do formy 3D grafu podľa schémy postupu merania, vid' obrázok 8.7 a 8.8.



Obrázok 8.7: Rozloženie svetla v priestore laboratória temná miestnosť.



Obrázok 8.8: Rozloženie svetla v priestore laboratória temná miestnosť (pohľad zhora).

Ako sa na základe simulácii očakávalo, najvyššie hodnoty prijatého optického výkonu sú v strede miestnosti o veľkosti plochy 2 m^2 . Táto plocha sa nachádza priamo pod svetelnou maticou, ktorá túto plochu osvetľuje výkonom $4,68 \cdot 10^{-6} - 3,09 \cdot 10^{-6} \text{ W}$. Hodnoty prijatého optického výkonu sa znižujú smerom k rohom miestnosti, kde má výkon hodnotu $0,43 \cdot 10^{-6} \text{ W}$. Použitie jednej svetelnej matice umiestnenej na stred miestnosti nedokáže distribuovať jednotný optický výkon po celej rozlohe miestnosti z dôvodu jej veľkých rozmerov. Použitie viacerých svetelných matíc by tento problém dokázalo odstrániť. Rozšírenie optického výkonu v miestnosti má gaussovský tvar, pričom výkon zväzku je daný polovičnou hodnotou súčinu maximálnej intenzity s plochou kruhu o polomere rovnajúcom sa stredovej polovičnej šírke zväzku, vid' vzťah (8.1).

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi \cdot W_o^2) \quad (8.1)$$

Tabuľka 8.1 porovnáva jednotlivé hodnoty získané pri simuláciach v programe MATLAB a LightTools s reálnymi hodnotami dosiahnutými pri meraní v laboratórnych podmienkach. Výsledky simulácii sa od výsledkov z reálneho merania v laboratóriu telekomunikačnej techniky (temná miestnosť) nepatrne líšia v hodnote prijatého optického výkonu. Pri simuláciach sa predpokladalo, že optický kanál v miestnosti tvorí iba priama trasa medzi vysielačom a prijímačom bez odrazov (LOS), pričom sa nepočítalo s nepatrnými odrazmi od elementov (steny, meracie zariadenia), ktoré nastali pri reálnom meraní v temnej miestnosti. Zároveň pri simuláciach a reálnom meraní nebol na detektore použitý filter, ktorý by prepustil iba obmedzené pásmo vlnových dĺžok. Simulácie a meranie teda prebehli pri určitej chybe merania, ktorá nemá vplyv na zistené výsledné hodnoty.

Tabuľka 8.1: Porovnanie výsledkov simulácii a reálneho merania (temná miestnosť).

Simulácia / Reálne meranie	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
Simulácia v programe MATLAB	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$3,21 \times 10^{-6}$
Simulácia v programe LightTools	$0,31 \cdot 10^{-6}$	$2,14 \times 10^{-6}$
Reálne meranie (temná miestnosť)	$0,43 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \times 10^{-6}$

9 Záver

Bakalárska práca hovorí o optických bezvláknových sieťach, o nových trendoch osvetľovania vnútorných priestorov a o využití viditeľného optického žiarenia k osvetľovaniu daného priestoru a súčasne ku komunikácii. Požiadavky na optické zdroje vhodné na osvetľovanie miestností neustále rastú, a preto sú klasické zdroje v súčasnosti úplne nahradzované progresívne sa rozvíjajúcou technológiou LED. Výskum tejto technológie v oblasti zvyšovania merného výkonu a možnosti zmeny farebného odtieňa s kvalitným podaním farieb CRI znamená nielen jej využitie pre osvetľovanie priestoru ale súčasne aj pre možnosť využitia ako vysielача v sieťach založených na optickom žiarení vo viditeľnej oblasti spektra VLC. V posledných rokoch môžeme zároveň pozorovať obrat smeru výskumu od prenosu informácie po optickom vlákne k prenosu prostredníctvom bezvláknových sietí. Z tohto dôvodu môžeme predpokladať, že v blízkej budúcnosti dôjde k rozširovaniu koncepcie využitia viditeľnej oblasti žiarenia k osvetľovaniu daného priestoru a súčasne ku komunikácii.

V teoretickej časti som sa venoval zdrojom optického žiarenia, ktoré sú vhodné pre osvetľovanie miestností. Porovnával som tu ich jednotlivé parametre, vlastnosti a technológie pričom som sa sústredil hlavne na technológiu LED. Práve táto technológia je, podľa môjho názoru, technológia budúcnosti, ktorá úplne nahradí súčasné klasické zdroje optického žiarenia pre svoje výborné vlastnosti, akými sú efektívne využívanie elektrickej energie, dlhá životnosť a spoľahlivosť. Následne som sa zaoberal optickými bezvláknovými dátovými sieťami, ktoré by mohli v budúcnosti bežne využívať technológiu LED ako vysielач v sieťach využívajúce viditeľnú oblasť spektra k prenosu informácie.

V záverečnej praktickej časti sa venujem testovaniu technológie LED a možnosti jej využitia k osvetľovaniu vnútorných priestorov. Cieľom práce bolo vybrať vhodný zdroj optického žiarenia na základe zistených parametrov a navrhnuť rozloženie zdrojov optického žiarenia pre dostatočné pokrytie celej miestnosti. Vybraným supersvietivím a výkonovým LED boli preto testované ich jednotlivé parametre v závislosti na zmene teploty okolia. Testované LED vykazovali so zvyšujúcou sa teplotou znižovanie optického výkonu a intenzity spektra, pričom nedochádzalo k deformácii jeho výsledného tvaru. Vybraná SMD LED 3528 vyžaruje na vlnovej dĺžke 450 nm pre oblasť modrej luminiscencie a 575 nm pre oblasť fosforescencie. Zároveň dosahuje optický výkon $P = 8,5 \text{ mW}$ pri pretekajúcom prúde $I_F = 32 \text{ mA}$ a vyžarovacom uhle 120° . Tento zdroj optického žiarenia bol použitý k zostaveniu svetelnej matice, ktorá bola simulovaná v programe MATLAB a LightTools a následne testovaná v reálnych podmienkach laboratória telekomunikačnej techniky (temná miestnosť). Pri simuláciách sa predpokladalo, že optický kanál v miestnosti tvorí iba priama trasa medzi vysielacom a prijímačom (LOS), pričom sa nepočítalo s nepatrnými odrazmi od elementov, ktoré nastali pri reálnom meraní v temnej miestnosti. Z tohto dôvodu sú hodnoty optického výkonu nameraného v temnej miestnosti nepatrne vyššie ako hodnoty získané pri simulácii. Pri ďalšom testovaní rozloženia svetla s priamou trasou medzi vysielacom a prijímačom (LOS) by bolo vhodné eliminovať nežiaduce odrazy od elementov v miestnosti. Druhou možnosťou testovania by mohla byť práve nepriama trasa medzi vysielacom a prijímačom (NLOS) a testovanie vplyvu jednotlivých prekážok na rozloženie svetla v priestore.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public s. r. o. ISSN 1212-0812
- [2] INDALUX. LIGHTING ENGINEERING 2002: Control and lighting application. INDALUX ILUMINACION TECNICA, S.L., 2002. Dostupné z: www.indalux.es
- [3] ČERVENĚ, Ivan. Fyzika po kapitolách 12: Optika. STU, 2007. ISBN 8022726740
- [4] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. Světelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9
- [5] K.V.S.S.S.S.SAIRAM. Optical Communications. LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD, 2007.
- [6] LUMILEDS, Philips. LUXEON® Rebel ES. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: www.philipslumileds.com/uploads/17/DS61-pdf
- [7] M. G. CRAFOR. LEDs for Solid State Lighting and Other Emerging Applications: Status, Trends, and Challenges. Dostupné z: <http://www.ieeetmc.net/r6/scv/eds/slides/20051213-George-Craford-Lumileds.pdf>
- [8] CREE. Cree ® Xlamp ® XP-E High-Efficiency White LEDs. Dostupné z: <http://www.cree.com/products/pdf/XLampXP-E-HEW.pdf>
- [9] Sccg.sk: Kolorimetria. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.sccg.sk/~durikovic/projects/HDRSky/kolorimetria.html>
- [10] LUMILEDS, Philips Lumileds. LUXEON® K2. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: www.philipslumileds.com/uploads/54/DS51-pdf
- [11] GFELLER, F. R. A U. BAPST. Wireless in-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. Proceedings of the IEEE. 1979, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.
- [12] PUŽMANOVÁ, Rita. Bezdrátová optika a její možnosti. Dostupné z: <http://www.dsl.cz/clanek/533-bezdratova-optika-a-jeji-moznosti>
- [13] IEC 60825-1. Safety of Laser Products. Švýcarsko: International Electrotechnical Commission. Ženeva, 1998.
- [14] WIMAX. LOS versus NLOS. Dostupné z: <http://www.conniq.com/WiMAX/nlos-los.htm>
- [15] IrDa - Kompletní popis. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/irda-kompletni-popis.html>
- [16] RICHTR, Tomáš. Protokoly technologie IrDA. Dostupné z: <http://tomas.richtr.cz/mobil/irda-protokoly.htm>
- [17] KOUDELKA, Petr. Studium vlastností optické bezvláknové datové sítě pro vnitřní prostory v oblasti viditelného optického záření. 2012. Vedoucí práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
- [18] PUŽMANOVÁ, Rita. Bílé LED – světlo budoucnosti. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36149

-
- [19] IEEE 802.15.7. PHY and MAC standard for short-range wireless optical communication using visible light. Dostupné z: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>
- [20] GHASSEMLOOY, Z., W. POPOOLA a S. RAJBHANDARI. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3
- [21] D. Wu, Z. GHASSEMLOOY, S. RAJBHANDARI a H. LE MINH. Channel Characteristics Analysis and Experimental Demonstration of a Diffuse Cellular Indoor Visible Light Communication System. School of CEIS, Northumbria University, Newcastle Upon Tyne
- [22] D.H. KIM, S.K. LIM a T.G. KANG. A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system. LED Communication Research Team, ETRI, South Korea
- [23] DAVID, T. Testovací měření na profesionálním atmosférickém optickém spoji, Ostrava, 2011. Bachelor thesis. VSB – Technical university of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science.
- [24] LINER, Andrej. The Optical Power Distribution in a Dark Room. Ostrava, Czech Republic, 2012. VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications.

Zoznam príloh

Príloha.A:	Vybrané fotografie experimentálnych pracovísk	I
Príloha.B:	Vybrané grafy charakteristík LED	II
Príloha.C:	Ukážka použitého MATLAB kódu	IV

Súčasťou BP je CD.

Adresárová štruktúra priloženého CD:

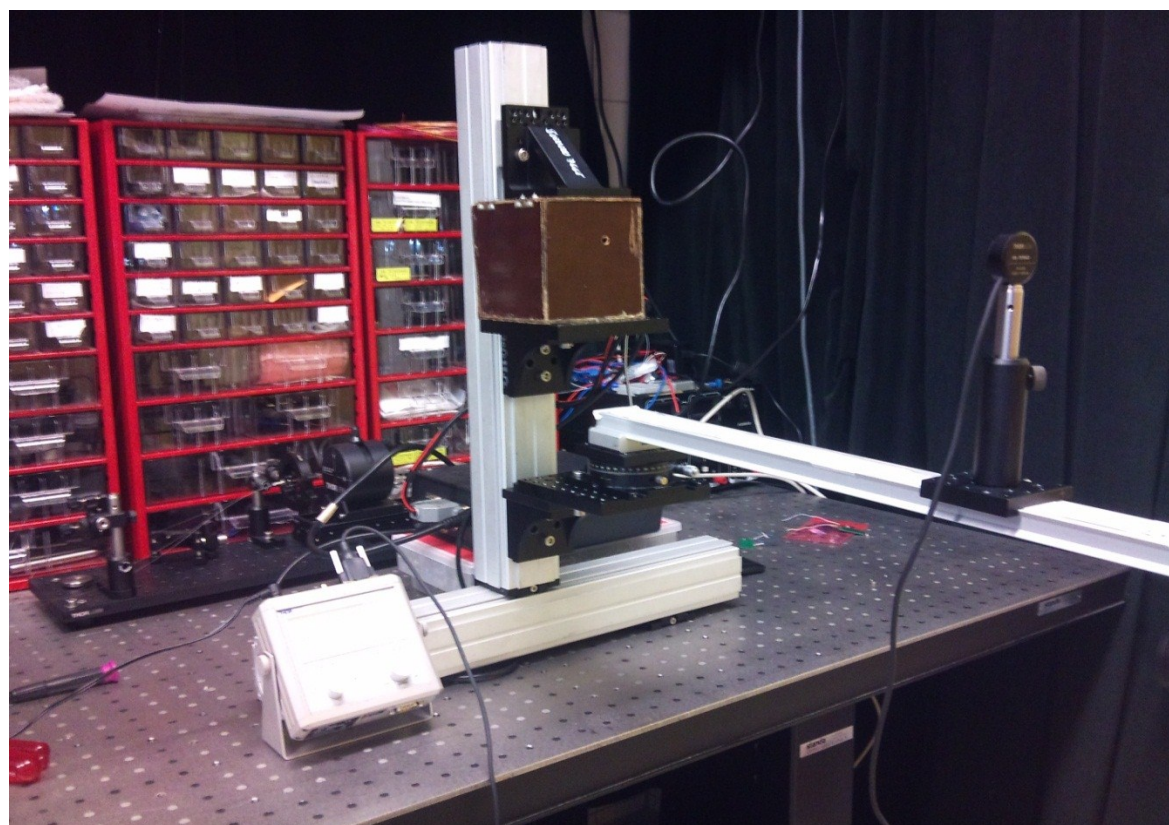
1. Fotografie z experimentálnych meraní
2. Spracované grafy nameraných hodnôt v programe MATLAB
 - PI charakteristika
 - Rozloženie svetla v priestore (temná miestnosť)
 - Simulácia v programe LightTools
 - Simulácia v programe MATLAB
 - Smerová vyžarovacia charakteristika
 - Spektrálna charakteristika
 - VI charakteristika
3. Tabuľky nameraných hodnôt
 - Parametre LED
 - RS_TEMNÁ MIESTNOSŤ

Príloha A: Vybrané fotografie experimentálnych pracovísk

Fotografia č.1: Experimentálne pracovisko - meranie optického výkonu, napätia a spektra

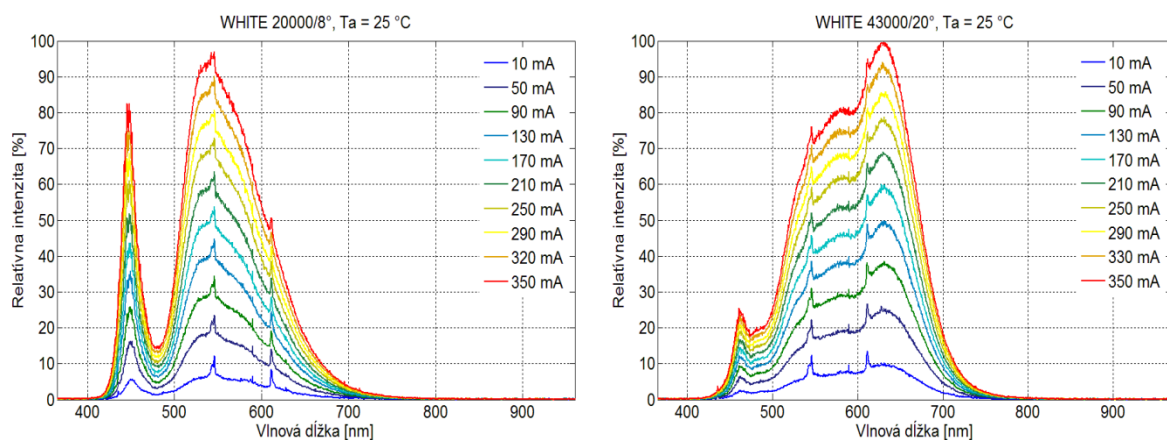


Fotografia č.2: Experimentálne pracovisko - meranie smerových vyžarovacích charakteristík

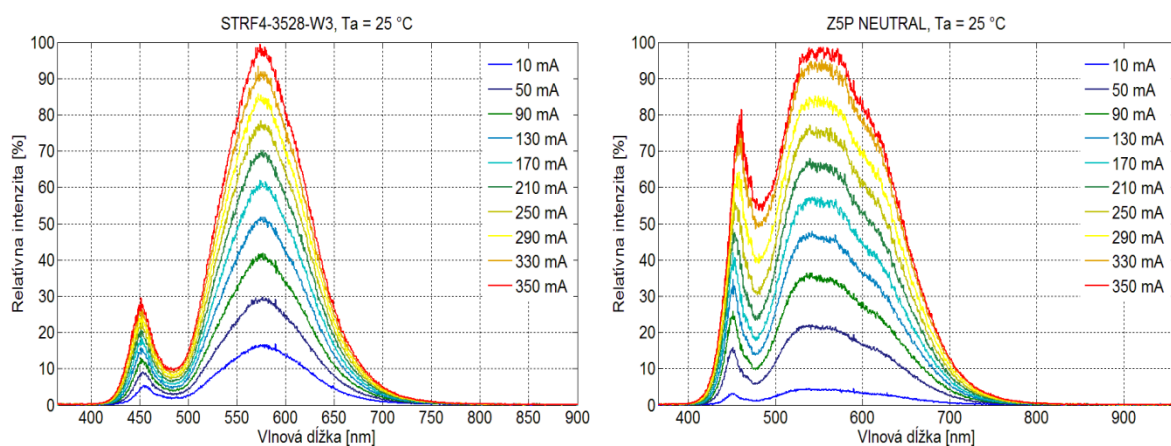


Príloha B: Vybrané grafy charakteristík LED

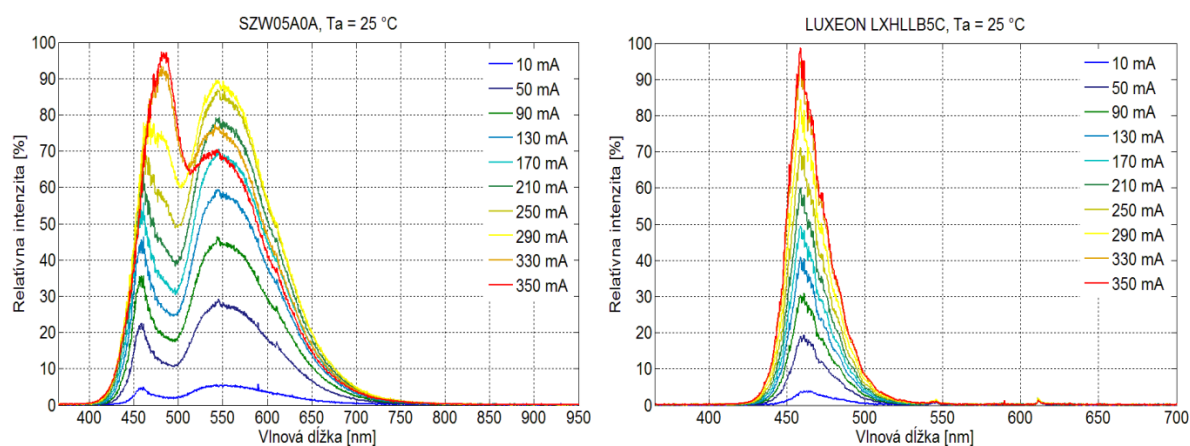
Graf č.1 a č.2: Spektrálne charakteristiky ($T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) - WHITE LED 20000/8°, WHITE 43000/20°



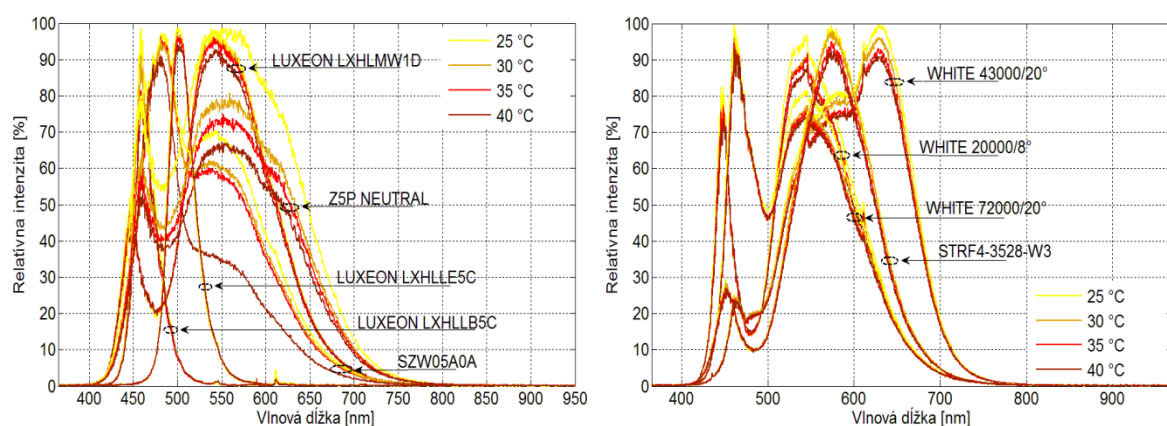
Graf č.3 a č.4: Spektrálne charakteristiky ($T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) - STRF4-3528-W3, Z5P NEUTRAL



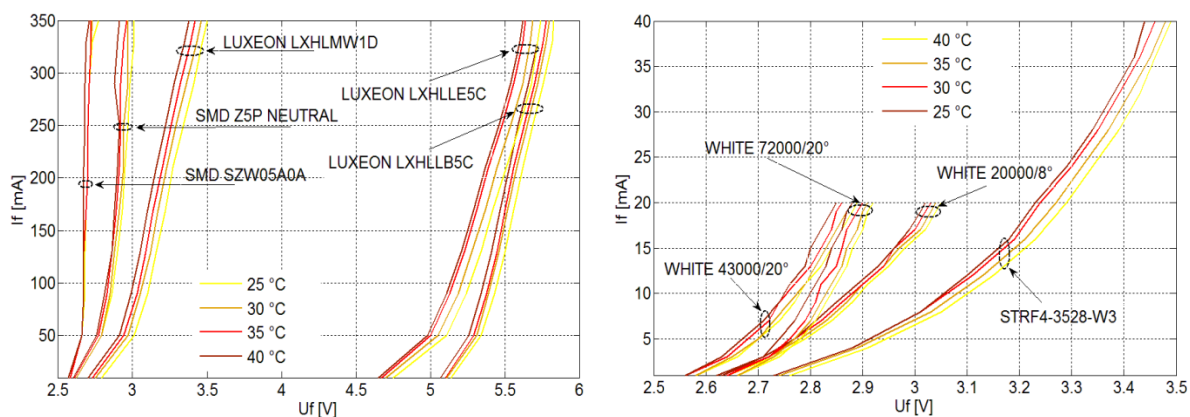
Graf č.5 a č.6: Spektrálne charakteristiky ($T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) - SZW05A0A, LUXEON LXHLLB5C



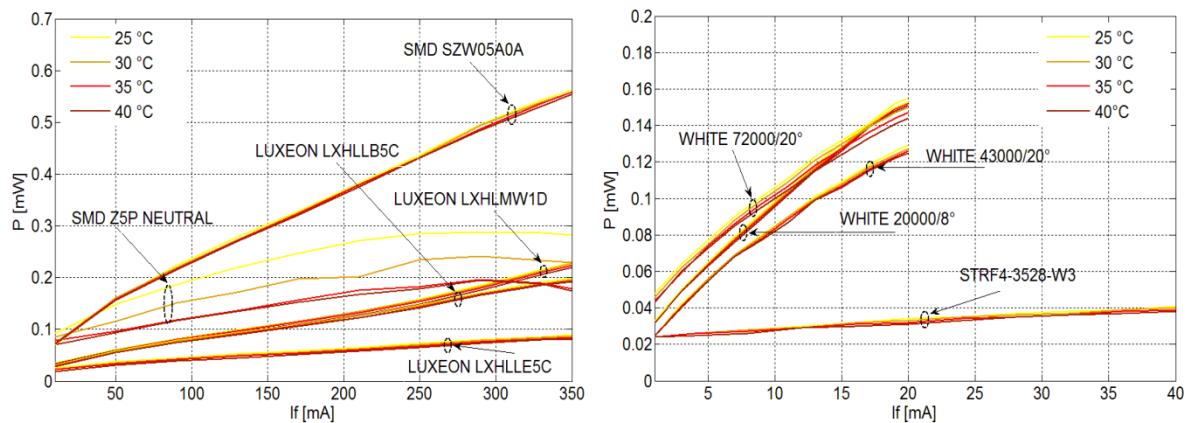
Graf č.7 a č.8: Spektrálne charakteristiky ($T_a = 25 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) - výkonové a supersvietivé LED



Graf č.9 a č.10: VI charakteristiky ($T_a = 25 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) - výkonové a supersvietivé LED



Graf č.11 a č.12: PI charakteristiky ($T_a = 25 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) - výkonové a supersvietivé LED



Príloha C: Ukážka použitého MATLAB kódu

Ukážka č.1: MATLAB kód - jedna svetelná matica

```
theta=60;
m=-log10(2)/log10(cosd(theta));
P_total=0.2125;
Adet=1e-4;
lx=2; ly=3.4.; lz=2.2;
h=1.45;
XT=0; YT=0;
Nx=lx*10; Ny=ly*10;
x=-lx/2:lx/Nx:lx/2;
y=-ly/2:ly/Ny:ly/2;
[XR,YR]=meshgrid(x,y);
D1=sqrt((XR-XT(1,1)).^2+(YR-YT(1,1)).^2+h^2);
cosphi_A1=h./D1;
H_A1=(m+1)*Adet.*cosphi_A1.^(m+1)./(2*pi.*D1.^2);
P_rec=P_total.*H_A1;
P_rec_dBm=10*log10(P_rec);
meshc(x,y,P_rec_dBm);
```

Ukážka č.2: MATLAB kód - štyri svetelné matice

```
theta=60;
m=-log10(2)/log10(cosd(theta));
P_LED=0.0085;
nLED=5;
P_total=nLED*nLED*P_LED;
Adet=1e-4;
lx=2; ly=3.4; lz=2.2;
h=1.45;
[XT,YT]=meshgrid([0.625 0.625], [0.975 0.975]);
Nx=lx*10; Ny=ly*10;
x=-lx/2:lx/Nx:lx/2;
```

```
y=-ly/2:ly/Ny:ly/2;
[XR,YR]=meshgrid(x,y);
D1=sqrt((XR-XT(1,1)).^2+(YR-YT(1,1)).^2+h^2);
cosphi_A1=h./D1;
H_A1=(m+1)*Adet.*cosphi_A1.^(m+1)./(2*pi.*D1.^2);
P_rec_A1=P_total.*H_A1;
P_rec_A2=fliplr(P_rec_A1);
P_rec_A3=flipud(P_rec_A1);
P_rec_A4=fliplr(P_rec_A3);
P_rec_total=P_rec_A1+P_rec_A2+P_rec_A3+P_rec_A4;
P_rec_dBm=10*log10(P_rec_total);
meshc(x,y,P_rec_dBm);
```